WOODLAND ENERGY

IMPIANTI TERMICI A LEGNA CIPPATO E PELLET

MANUALE PRATICO

TECNOLOGIE | ASPETTI PROGETTUALI | NORMATIVA

Regione Toscana
Diritti Valori Innovazione Sostenibilità

Arsia

AIEL
ASSOCIAZIONE ITALIANA
ENERGIE AGROFORESTALI

WOODLAND ENERGY

IMPIANTI TERMICI A LEGNA CIPPATO E PELLET

ARSIA – Agenzia Regionale per lo Sviluppo
e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale
Via Pietrapiana, 30 – 50121 Firenze
tel. 055 27551 – fax 055 2755216 / 2755231
www.arsia.toscana.it
email: posta@arsia.toscana.it

Coordinamento della pubblicazione
Tiziana Mazzei, Gianfranco Nocentini – ARSIA

Autori
Valter Francescato, Eliseo Antonini – AIEL

Foto
AIEL

Progetto grafico
Marco Dalla Vedova

Stampa
Litocenter Srl - Limena (Pd)
Finito di stampare nel mese di novembre 2009

Fuori commercio, vietata la vendita
ISBN 978-88-8295-110-8
Copyright 2009 ARSIA Regione Toscana

SOMMARIO

PRESENTAZIONE 5

INTRODUZIONE 7

1. COMBUSTIONE DEL LEGNO 9
1.1 Termini e concetti di base 9
1.2 Processo di combustione 13
1.3 Requisiti tecnico-costruttivi degli apparecchi 15

2. CALDAIE MANUALI E AUTOMATICHE 17
2.1 Principio di funzionamento delle caldaie manuali 17
2.2 Caldaie a legna 18
2.3 Accumulatore di calore e collegamenti idraulici 23
2.4 Caldaie a caricamento automatico 28
2.4.1 Tipologie di focolari 28
2.4.2 Caldaie sottoalimentate 30
2.4.3 Caldaie ad alimentazione laterale 30
2.4.4 Caldaie con focolare a caduta 34
2.4.5 Componenti delle caldaie automatiche e sistemi collegati 35
2.4.6 Sistemi d'estrazione e d'alimentazione 38
2.4.7 Fornitura, stoccaggio e logistica del cippato 42
2.4.8 Fornitura, stoccaggio e logistica del pellet 44
2.4.9 Sistemi di sicurezza 47
2.4.10 Sistemi di regolazione 49

3. MINIRETI DI TELERISCALDAMENTO 51
3.1 Densità degli allacciamenti e dimensionamento 51
3.2 Tubazioni 51
3.2.1 Posa in opera 53
3.3 Fornitura di ACS nelle minireti 53

4. INVESTIMENTI E COSTI DI GESTIONE 55
4.1 Investimento per tipo di impianto e classi di potenza 55
4.2 Costo della rete 58
4.3 Costi di gestione e manutenzione 58
4.4 Spesa elettrica 59
4.5 Costi delle opere edili 60

5. RENDIMENTI ED EMISSIONI 61
5.1 Rendimenti 61
5.2 Emissioni 64
5.2.1 Composizione e impatto sulla salute 64
5.2.2 Fattori di conversione 65
5.2.3 Livelli di emissione delle caldaie 65
5.3 Normativa su emissioni e rendimenti 70
5.3.1 Normativa europea 70
5.3.2 Normativa italiana 72
5.4 Norme per la gestione, manutenzione e sicurezza 73

BIBLIOGRAFIA 77

ALLEGATO 79
Principali produttori e distributori di caldaie 79

PRESENTAZIONE

La Regione Toscana, attraverso l'Arsia in questi ultimi anni, si è impegnata nella realizzazione di svariati progetti relativi alle agrienergie, cioè le energie provenienti dal mondo agricolo e forestale, con la finalità di promuovere e sviluppare sul proprio territorio filiere agrienergetiche che rispondessero a criteri di sostenibilità ambientale ed economica.
In questo contesto l'attività dell'Arsia si è incentrata particolarmente sulla filiera bosco-legno energia, nella consapevolezza dell'importanza che questa filiera ha per lo sviluppo sostenibile dei territori rurali, data anche l'entità della superficie forestale toscana.
I modelli agrienergetici promossi e concretamente realizzati hanno interessato progetti di autoconsumo (attraverso la realizzazione di una filiera su scala aziendale, finalizzata all'alimentazione di un impianto termico individuale), di vendita dei combustibili legnosi e il modello del "legno energia contracting", la forma più remunerativa per gli operatori primari, in cui le imprese agro-forestali singole o associate gestiscono l'intera filiera-legno-energia fino alla vendita diretta dell'energia termica ad utenze pubbliche e private.
Nel settore legno-energia l'Agenzia ha svolto inoltre numerose attività dimostrative e divulgative nei confronti degli operatori, le più recenti delle quali svolte nell'ambito del Progetto interregionale WoodLand Energy, cofinanziato del Programma ProBio del MiPAAF, che ha visto la partecipazione di 9 Regioni italiane. Il progetto ha consentito di predisporre alcuni protocolli tecnici di utilizzazione per le operazioni di taglio, raccolta, prima trasformazione, trasporto e stoccaggio della biomassa legnosa al fine di ottimizzare i costi e i tempi relativi alla produzione dei combustibili legnosi e ha inoltre permesso di realizzare e monitorare impianti termici a carattere pilota.
Ulteriori importanti iniziative in corso di svolgimento sono state attivate nell'ambito del progetto europeo "Biomass Trade Centres", cofinanziato dalla Commissione Europea con il programma Energia Intelligente per l'Europa, coordinato dall'Associazione Italiana Energie Agroforestali e con la partecipazione di Arsia e di numerosi altri partner. Questa iniziativa intende promuovere a scala regionale la diffusione dei combustibili legnosi, in particolare della legna da ardere e del cippato tramite azioni di supporto

all'organizzazione di piattaforme logistico-commerciali per la produzione e la vendita di combustibili legnosi, di supporto ai consumatori all'acquisto di combustibili legnosi e attraverso azioni per il coordinamento e la formazione dei produttori e rivenditori.
In questo panorama di attività, abbiamo rilevato la necessità di mettere a disposizione degli attori della filiera legno - energia un ulteriore strumento operativo che potesse completare il quadro delle informazioni disponibili per questa tipologia di filiera, ed in particolare un manuale tecnico che prendesse in considerazione con i dovuti approfondimenti e dettagli tecnici, gli aspetti relativi agli impianti termici.
La presente pubblicazione, contenente informazioni tecniche di dettaglio sulle tecnologie, sugli aspetti progettuali e normativi inerenti gli impianti termici a combustibili legnosi, è rivolta non solo agli operatori agro-forestali, ma anche agli installatori degli impianti nonché agli utenti finali, nella convinzione che soltanto con un corretto approccio tecnico si possa effettivamente garantire la sostenibilità economica ed ambientale della filiera.

Maria Grazia Mammuccini
Direttore Arsia

INTRODUZIONE

In Toscana il legno, quando viene utilizzato come combustibile, trova impiego principalmente in apparecchi domestici tradizionali. Delle circa 1,7 milioni di tonnellate di legna consumate annualmente a scala regionale, il 65% è ancora impiegato in caminetti aperti e il 30% in stufe tradizionali e camini a inserto. Negli ultimi anni la Regione Toscana, in particolare attraverso le attività dell'Arsia, ha promosso la diffusione delle moderne caldaie a legna, cippato e pellet di piccola-media potenza e le minireti di teleriscaldamento.

Le moderne caldaie sono gli apparecchi termici a combustibili legnosi caratterizzati dai più alti rendimenti e dai più bassi livelli di emissioni nocive. Nonostante in Toscana il mercato delle caldaie sia in forte crescita, si tratta ancora di numeri modesti, specie per il cippato. Esistono infatti ancora numerosi ostacoli alla piena affermazione di questo mercato, tra questi, i principali sono la scarsa conoscenza delle caratteristiche tecniche delle caldaie, i loro possibili campi di applicazione e i benefici socio-economici e ambientali che ne derivano. Nonostante i passi avanti fatti negli ultimi anni in Toscana, alcune categorie chiave di questo settore, in particolare i progettisti e gli installatori, per scarsa o approssimativa conoscenza di queste applicazioni, sono spesso ancora molto diffidenti e rinunciano ad orientare i propri clienti verso l'installazione di moderne caldaie. Dall'altro lato, per gli stessi motivi, anche i potenziali "clienti" di questo settore – famiglie, imprese, enti pubblici – scelgono ancora troppo occasionalmente questi innovativi apparecchi termici per riscaldarsi in modo efficiente e confortevole.

Questo manuale pratico intende contribuire ad aumentare il livello delle conoscenze tecniche sui generatori di calore e sugli impianti alimentati con combustibili solidi legnosi, fornendo alcuni dati e informazioni riguardanti le loro caratteristiche tecniche, il dimensionamento, la progettazione degli impianti e gli aspetti economici e normativi salienti.

Valter Francescato, Eliseo Antonini

1. COMBUSTIONE DEL LEGNO

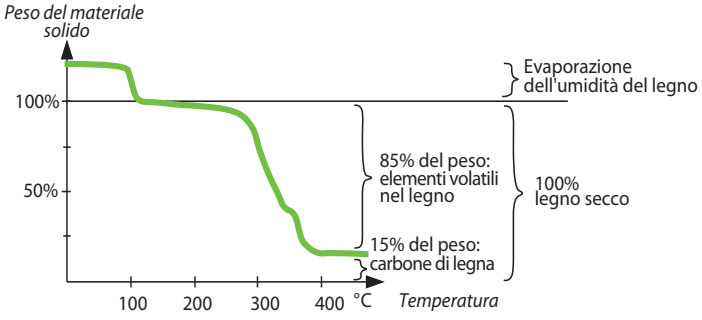
1.1 Termini e concetti di base

Prima di descrivere le fasi che caratterizzano la combustione del legno è opportuno introdurre brevemente alcuni termini e concetti di base utili alla comprensione di quanto sarà detto successivamente, con riferimento alle caratteristiche delle caldaie e degli impianti termici.

Componente volatile

È la componente del legno – prevalentemente gassosa – rilasciata nella fase di riscaldamento del legno (t > 150°C). In termini quantitativi è inversamente proporzionale alla componente carboniosa (carbone di legno). Nei combustibili legnosi è in media l'85% della s.s., mentre è più bassa (74-76%) nelle biomasse erbacee (paglia). Nei combustibili fossili (carbone) varia invece nel range 6-63%.

Figura 1.1.1 *Suddivisione percentuale delle componenti del legno e loro comportamento durante la combustione* [6]



Acqua di combustione e punto di rugiada

Nel corso della combustione del legno evapora sia l'acqua di imbibizione, durante le prime fasi della combustione, sia l'acqua di saturazione indicata anche come "acqua di combustione". Queste componenti determinano il contenuto d'acqua nei fumi di scarico al camino, sulla base del quale è definito il loro punto di rugiada. Ad esempio impiegando legno secco – con un eccesso d'aria di 1,5 – il punto di rugiada è pari a 45°C e sale a 62°C nel caso di impiego di legno umido. Sotto il punto di rugiada si ha la condensazione dei gas che possono determinare un

effetto corrosivo sia nel camino che in altre componenti dell'impianto. Nella maggior parte dei casi applicativi, perciò, i fumi di scarico della combustione del legno – in funzione del contenuto d'acqua e dell'eccesso d'aria - non dovrebbero scendere sotto ad una certa temperatura.
Tranne i casi in cui l'energia d'evaporazione dell'acqua è recuperata attraverso un condensatore, essa rappresenta una perdita energetica che, in particolare nel caso d'impiego di combustibili molto umidi, peggiora notevolmente il bilancio energetico complessivo. Tuttavia, poiché il rendimento dell'apparecchio, il più delle volte, è riferito al potere calorifico inferiore (pc_M) e non a quello superiore, il peso della differenza tra combustibili secchi e umidi gioca un ruolo marginale.

Numero dell'eccesso d'aria

Per assicurare una completa ossidazione dei composti ossidabili contenuti nel legno generalmente è fornito al processo di combustione un surplus d'aria, ovvero un eccesso di ossigeno corrispondente alla quantità teorica necessaria per ossidare completamente il combustibile. Il grado d'eccesso d'aria è indicato con il numero Lambda (λ), corrispondente al rapporto tra:
– la quantità d'aria complessivamente fornita nell'unità di tempo al processo d'ossidazione e
– la quantità d'aria minima necessaria per la completa ossidazione.

$$\lambda = \frac{q_{aria\ tot.}}{q_{aria\ min.}}$$

Per un'ossidazione completa, quindi, il numero Lambda deve essere almeno pari a 1 (nessun eccesso d'aria). Di fatto nel caso d'apparecchi termici a legna varia tra 1,5 e 2,5, ovvero la combustione avviene sempre in una condizione d'eccesso d'aria.

Combustione

Il carbonio (C) o l'idrogeno (H) in presenza di ossigeno (O_2) sono ossidati liberando energia con formazione di CO_2 e di H_2O. Questo processo descrive la combustione delle biomasse, composte fondamentalmente di (C), ossigeno (O) e idrogeno (H) e può essere indicato con la seguente formula chimica $C_nH_mO_p$. Si parla di "combustione completa" quando tutte le componenti ossidabili sono completamente ossidate. Il numero d'eccesso d'aria quindi deve sempre essere uguale o superiore a 1. In carenza d'aria – ovvero quando λ <1 – dopo le reazioni di ossidazione rimangono ancora quantità di combustibile non ossidate o ossidate parzialmente (CO e C_nH_m) e si parla in questo caso di combustione incompleta.

Gassificazione

Quando un combustibile - ad es. il carbonio (C) – in aggiunta di ossigeno è ossidato e parzialmente combusto ($0<\lambda<1$) formando CO (piuttosto che CO_2) si parla di gassificazione o combustione parziale. Il gas così sviluppato (CO) può essere condotto in un altro processo tecnico dove può essere ossidato sottoponendolo ad un successivo apporto energetico. Attraverso la gassificazione il legno è quindi trasformato in gas combustibile che poi – almeno in teoria – può essere impiegato in modo efficiente per la produzione di energia elettrica e termica.

Pirolisi

Anche nel caso della pirolisi si tratta di un processo termochimico, tuttavia in questo caso il processo avviene esclusivamente sotto l'azione del calore e in assenza di ossigeno (λ=0). Poiché i biocombustibili contengono ossigeno (es. il legno ca. 44% O_2) si tratta di reazioni di decomposizione piuttosto che di ossidazioni. Oltre che per i processi termochimici di decomposizione pirolitica, il concetto di pirolisi è applicato anche per la produzione di vettori energetici fluidi prodotti da biomasse solide in specifici impianti (BTL = *Biomass to Liquid*).

Rendimento al focolare (η_f)

Il rendimento al focolare tiene conto delle perdite nei gas di scarico del focolare (fuoco) in forma di perdite termiche e chimiche. Particolarmente importanti sono: la temperatura dei fumi, l'eccesso d'aria (contenuto di O_2 o CO_2) così come il CO ed eventuali altri incombusti nei fumi. In questo caso, le perdite per radiazione e convezione del focolare e le perdite di arresto non sono considerate nel calcolo del rendimento. Il rendimento si calcola secondo l'equazione: $\eta f = 1-P_{term}-P_{chim}$ che considera le perdite termiche (P_{term}) rilevabili dal calore dei gas di scarico e le perdite chimiche (P_{chim}) legate all'incompleta combustione. Le perdite termo-chimiche sono riferite alla quantità d'energia espressa dal pc_M del combustibile.

Rendimento della caldaia (η_k)

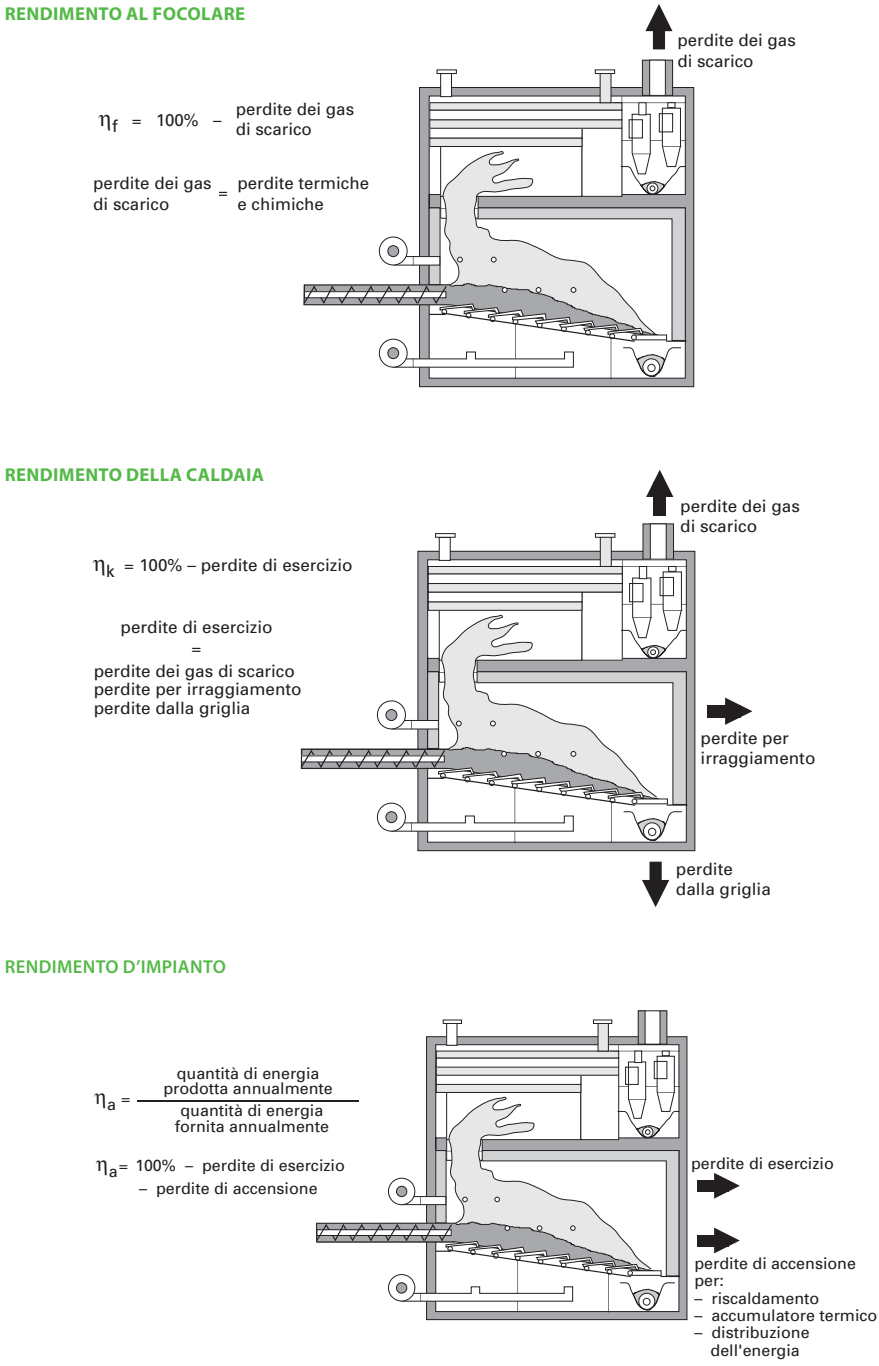
Il rendimento dell'apparecchio è espresso dal rapporto tra la quantità d'energia utile fornita dal vettore termico (acqua) e la quantità d'energia primaria immessa nell'apparecchio con il combustibile (pc_M della massa in ingresso). In questo caso, accanto alle perdite nei gas di scarico, contemplate nel rendimento al focolare, sono considerate in aggiunta anche quelle per radiazione e le perdite della griglia. Le perdite per radiazione derivano dal rilascio di calore della caldaia (nel vano tecnico) mentre le perdite dalla griglia sono legate ai residui incombusti nelle ceneri. Il rendimento della caldaia è di qualche punto percentuale più basso del rendimento al focolare; tuttavia, attraverso il miglioramento della coibentazione della caldaia ed una efficace combustione i due valori possono avvicinarsi molto.

Rendimento d'impianto (η_a)

Anche il rendimento d'impianto è posto in relazione al rapporto tra l'energia termica utile prodotta e l'energia immessa con il combustibile. Tuttavia, si tratta in questo caso di un parametro calcolato su un ampio intervallo di osservazione con condizioni di utilizzo molto variabili (periodo di riscaldamento, anno solare), riferito all'intero sistema di conversione energetica. Perciò, accanto alle perdite di esercizio sono anche tenute in considerazione le perdite dell'impianto (accensione, raffreddamento e mantenimento brace) così come le eventuali perdite ascrivibili alla presenza di un accumulatore di calore inerziale e alla distribuzione del calore (collettori, rete).

Il rendimento d'impianto è il parametro essenziale per descrivere la bontà tecnico-energetica di un impianto.

Figura 1.1.2 *Illustrazione grafica dei concetti di rendimento al focolare, rendimento della caldaia e rendimento d'impianto* [6]


RENDIMENTO AL FOCOLARE
η_f = 100% – perdite dei gas di scarico
perdite dei gas di scarico = perdite termiche e chimiche
perdite dei gas di scarico
RENDIMENTO DELLA CALDAIA
η_k = 100% – perdite di esercizio
perdite di esercizio = perdite dei gas di scarico perdite per irraggiamento perdite dalla griglia
perdite dei gas di scarico
perdite per irraggiamento
perdite dalla griglia
RENDIMENTO D'IMPIANTO
η_a = quantità di energia prodotta annualmente / quantità di energia fornita annualmente
η_a = 100% – perdite di esercizio – perdite di accensione
perdite di esercizio
perdite di accensione per:
– riscaldamento
– accumulatore termico
– distribuzione dell'energia

1.2 Processo di combustione

Il processo di combustione può essere sostanzialmente descritto attraverso i seguenti stadi intermedi successivi:

- **riscaldamento** del combustibile attraverso l'irradiamento della fiamma, del letto di braci e delle pareti della camera di combustione
- **essiccazione** del combustibile attraverso l'evaporazione e il rilascio dell'acqua che avviene a partire da 100 °C
- **decomposizione pirolitica** della s.s. del legno per effetto della temperatura a partire da 150 °C
- **gassificazione della s.s. del legno** con ossigeno e formazione di gas combustibili (CO e C_nH_m) e carbone solido (da ca. 250 °C)
- **gassificazione del carbone solido** con CO_2, vapore d'acqua e O_2 e formazione di CO (da ca. 500 °C)
- **ossidazione dei gas** combustibili con ossigeno e produzione di CO_2 e H_2O nell'ambito di un intervallo di temperature comprese tra 700 e 1400 °C (reale) fino a ca. 2000 °C (teorica)
- **trasferimento del calore** della fiamma allo scambiatore e in seguito al nuovo combustibile in ingresso.

Il legno è dapprima **riscaldato** attraverso l'irradiamento della fiamma, del letto di braci e delle pareti della camera di combustione, ma anche attraverso convezione e conduzione termica di calore nel combustibile.
L'**evaporazione** dell'acqua di imbibizione e saturazione inizia a partire da 100 C°. A questo punto procede il fronte d'essiccazione dall'esterno all'interno del legno; la velocità di tale fronte è funzione della capacità di conduzione di calore, ovvero della massa volumica del legno.
Non appena essiccate le particelle del combustibile, inizia la **decomposizione pirolitica** del legno, indotta dall'aumento di temperatura. Avviene così la rottura dei composti a catena lunga (nel legno per lo più la cellulosa) trasformati in composti a catena corta, da cui si formano gas combustibili quali il CO, gli idrocarburi carboniosi in forma gassosa e gli oli pirolitici (catrami). Questo processo non richiede O_2 perché utilizza quello messo a disposizione dalla rottura dei legami chimici causata dalla reazione di ossidazione, nel corso del rilascio del calore disponibile. Si tratta quindi dell'O_2 immagazzinato in forma chimica che nel legno è ca. il 44% della s.s., oltre a quello messo a disposizione dall'immissione di aria comburente.
Per mantenere attivo il processo di gassificazione del legno ed ottenere la potenza termica voluta, è fornita nella zona della decomposizione pirolitica (letto di braci) aria-ossigenata chiamata "aria primaria".
Nella fase di **gassificazione** è fornito il calore necessario alla reazione (incompleta) dei prodotti pirolitici gassosi, in presenza di ossigeno. Per permettere che i prodotti piroli-

tici solidi e gassosi (carbone, catrami) possano essere aggrediti è necessario arrivare ad una temperatura superiore ai 500 °C (figura 1.2.1). Sotto l'effetto dell'aria-ossigenata qui iniettata ("aria secondaria"), avviene una più o meno completa ossidazione dei prodotti gassosi liberati quali il CO e C_nH_m, da cui, attraverso la formazione di prodotti intermedi (es. idrogeno), si formano CO_2 e H_2O. Dalla decomposizione degli idrocarburi carboniosi si forma CO come prodotto intermedio, che è poi ossidato formando CO_2. In questa fase la combustione è auto-catalizzata ed esotermica (libera calore) e irradia luce e calore dalla fiamma. Le reazioni d'ossidazione forniscono così l'energia ai prevalenti processi endotermici di riscaldamento, essiccazione e decomposizione pirolitica (figura 1.2.2).
Oltre che dalla caratteristica "fiamma viva", l'ossidazione del legno è altrettanto significativa anche nella fase di "fiamma lenta". Questa forma d'ossidazione si presenta nello stadio finale dei processi di combustione e genera quali prodotti finali della decomposizione pirolitica **carbone solido** (degassificazione residua) che è dapprima gassificato sul letto di braci e alla fine ossidato nella fase gassosa. Quale residuo solido della combustione rimangono le **ceneri**.
Il fenomeno del fuoco scoppiettante nel corso della combustione è ben conosciuto; esso avviene a causa dell'esplosione delle cellule sottoposte a pressione durante l'innalzamento della temperatura. Tale pressione è particolarmente elevata nei legni ricchi di resina, poiché le resine a partire da ca. 60 °C rammolliscono e vanno così ad ostruire nel legno le vie radiali di fuoriuscita del vapore d'acqua.

Figura 1.2.1 *Temperatura del ciocco di legna misurata per mezzo di una termocoppia nel corso del processo di combustione. Intorno ai 100 °C l'assestamento della temperatura indica il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore dopo di che si ha un repentino aumento della temperatura nelle fasi di decomposizione pirolitica e gassificazione [2]*

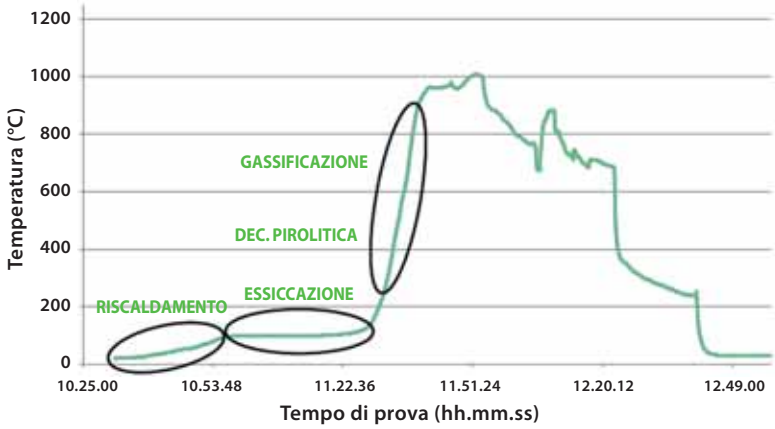
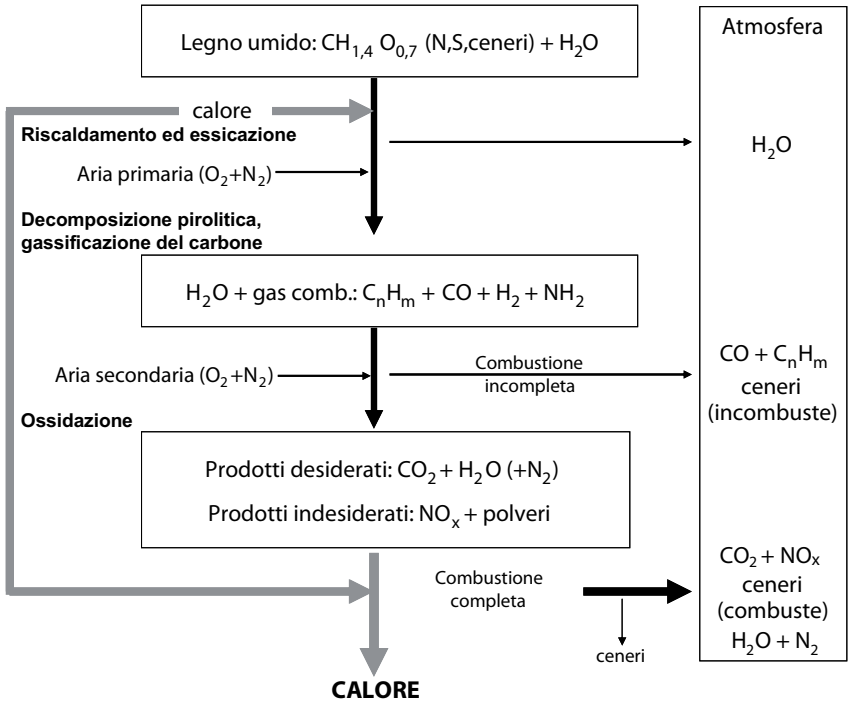


Figura 1.2.2 *Processi della combustione del legno: essiccazione, gassificazione con aria primaria e ossidazione con aria secondaria* [1]



1.3 Requisiti tecnico-costruttivi degli apparecchi

Per ottenere un elevato rendimento e un basso livello di emissioni nocive, la tecnica costruttiva degli apparecchi di combustione deve tenere in considerazione le differenti caratteristiche qualitative dei biocombustibili solidi, tra queste il contenuto di sostanze volatili rappresenta sicuramente il più importante.
In base alle descritte caratteristiche del processo di combustione, possono essere evidenziati i concetti di base per creare i presupposti di una completa combustione del legno:

- fornitura di un mezzo di ossidazione (aria) in eccesso
- raggiungere un sufficiente tempo di permanenza della miscela gas combustibili-aria comburente nella zona di reazione
- raggiungere una temperatura di combustione sufficientemente elevata
- garantire una buona mescolanza dei gas combustibili con l'aria comburente attraverso un'elevata turbolenza.

Su tali basi si possono regolare sia la potenza che il corso della combustione, cercando di mantenere spazialmente separate la zona di decomposizione e gassificazione del combustibile so-

lido - indotte con aria primaria nel letto di braci - dalla zona di ossidazione dei gas - favorita dall'iniezione di aria secondaria nella seconda camera di combustione. Entrambi i flussi d'aria devono essere separatamente regolabili. L'aria primaria influenza la potenza del focolare mentre l'aria secondaria è responsabile principalmente della completa ossidazione dei gas combustibili. Nella zona di combustione secondaria sono raggiungibili elevate temperature senza particolari problemi, per lo meno negli apparecchi di grossa taglia.
Attraverso una buona mescolanza dei gas combustibili con aria comburente e una elevata temperatura di combustione, l'eccesso d'aria può essere mantenuto quanto più basso possibile, per ottenere così un ottimale processo di combustione (quasi) privo di emissioni di gas incombusti. Un più basso eccesso d'aria è anche un presupposto per l'impiego di combustibili umidi. In questo caso il fabbisogno di energia per la vaporizzazione dell'acqua abbassa il livello di temperatura nel focolare e in aggiunta a questo, il vapore formato, aumentando il volume del flusso dei gas di scarico determina un ulteriore prelievo di energia dalla zona calda. Con l'ottimizzazione dell'eccesso d'aria è assicurata una sufficiente temperatura di combustione evitando inutili perdite di calore del focolare. Il contenimento delle perdite termiche per radiazione avviene attraverso l'isolamento delle zone di combustione primaria e secondaria con appositi rivestimenti quali ad esempio argilla refrattaria, cemento refrattario e materiali ceramici. Nella maggior parte degli apparecchi la quota più consistente del calore disponibile non è scambiato subito nel focolare ma piuttosto è ceduto ad un vettore termico separato a contatto con la zona calda di combustione dei gas (scambiatore di calore). Attraverso il miglioramento dell'ossidazione dei gas nella seconda camera di combustione si riduce anche la formazione di catrami e il deposito di fuliggine sulla superficie di scambio con il vettore termico.
Un precoce prelievo del calore dal focolare può essere sensato nel caso d'impiego di combustibili molto secchi o di speciali dispositivi per mezzo dei quali si desidera ottenere un raffreddamento della griglia per regolare la temperatura del letto di braci (es. caso dei combustibili caratterizzati da bassi punti di fusione delle ceneri). I sistemi di raffreddamento della griglia consentono di lavorare senza eccessi di aria primaria impiegata come aria di raffreddamento.

I descritti requisiti tecnico-costruttivi sono talvolta riassunti nella dizione della **"Regola delle 3-T" (Tempo-Temperatura-Turbolenza)** che indica in modo sintetico il fondamentale ruolo dell'ottimizzazione dell'intensità di mescolamento, del tempo di permanenza e della temperatura di combustione.

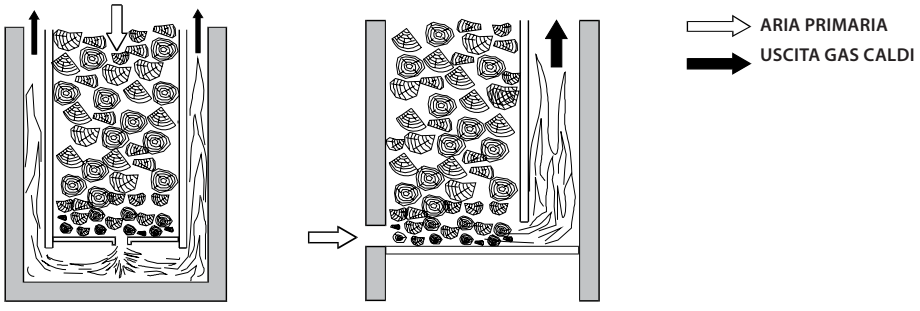
2. CALDAIE MANUALI E AUTOMATICHE

Gli apparecchi termici alimentati con combustibili legnosi si dividono in generatori a caricamento manuale (a legna) e a caricamento automatico (a cippato/pellet).

2.1 Principio di funzionamento delle caldaie manuali

Le moderne caldaie utilizzano il principio di funzionamento a fiamma o tiraggio inferiore. In questo tipo di caldaie la fiamma si sviluppa verso il basso sotto il corpo del focolare o lateralmente ad esso; si parla quindi di focolare a fiamma inferiore o laterale (figura 2.1.1). Alla combustione prende parte solo lo strato inferiore della carica di legna. I gas combustibili rilasciati dall'effetto dell'aria primaria sono indirizzati - sotto l'azione di un ventilatore - in una camera di combustione inferiore o laterale rispetto allo spazio occupato dal combustibile, nella quale l'aria secondaria induce le fasi successive della combustione.

Figura 2.1.1 *Principio del focolare a fiamma inferiore (sinistra) e laterale (destra)* [1]



I **focolari a fiamma inferiore o rovesciata** possiedono nel mezzo del corpo del focolare in posizione simmetrica una fessura allungata o un iniettore presso il quale, al di sopra della superficie del letto di braci, si manifestano condizioni della combustione relativamente costanti. La camera di combustione sottostante occupa quindi una parte dell'altezza di costruzione (dell'apparecchio), che generalmente è delimitata dal volume di riempimento del vano di stoccaggio della legna.

Nei **focolari a fiamma laterale** si forma invece un flusso asimmetrico dei gas combustibili nell'ambito della zona di combustione primaria (letto di braci). L'iniettore dei gas combustibili, attraverso il quale i gas entrano nella zona di combustione secondaria, è posto lateralmente, così che lo spazio rettangolare in cui si sviluppa la fiamma è alimentato da flussi d'aria primaria con differente intensità. Qui potrebbero rimanere perciò residui carboniosi non completamente combusti. Per evitare questo inconveniente una parte dell'aria primaria può essere fatta entrare attraverso una griglia che, oltre a favorire la completa combustione del carbone residuo, agevola la rimozione della cenere.
Il principio costruttivo della fiamma laterale consente la costruzione di apparecchi più compatti e di altezza più contenuta, perciò rispetto ai focolari inferiori a parità di altezza dell'apparecchio si possono ottenere vani di stoccaggio della legna più capienti.

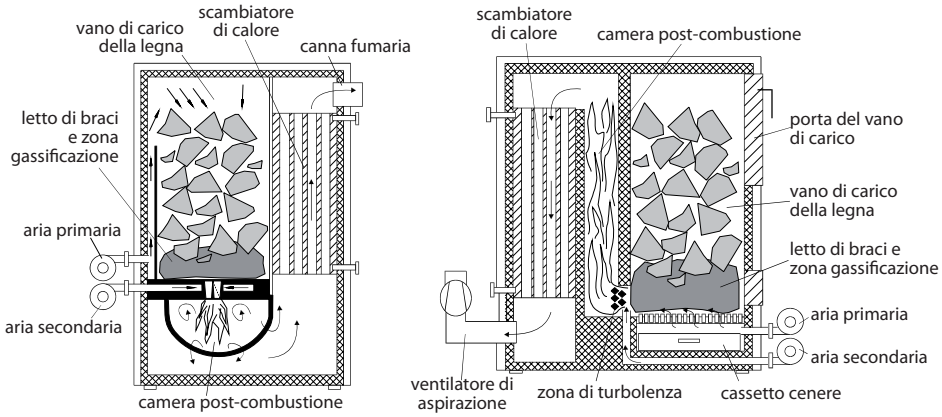
Sopra il letto di braci si trova la carica di legna che nel corso della combustione scivola verso il basso alimentando (quasi) di continuo il letto di braci.
In una caldaia a legna la combustione della carica impiega ca. 5 o più ore. Il focolare inferiore consente una decomposizione pirolitica e gassificazione del combustibile relativamente continue. Questo migliora l'adeguamento della quantità d'aria comburente nella fase di rilascio dei gas combustibili, per cui si ottiene una migliore fase finale del fuoco e di conseguenza una migliore qualità della combustione.
La tecnica costruttiva del focolare a fiamma inferiore/laterale, con i suoi vantaggi, sta alla base delle moderne caldaie centralizzate a legna e rappresenta oggi il principio di funzionamento più applicato. Rispetto ai focolari a fiamma superiore, che caratterizzano gli apparecchi termici domestici, esso non può rinunciare all'applicazione dei sistemi di aria forzata in aspirazione o immissione.

2.2 Caldaie a legna

Le caldaie a legna centralizzate provvedono alla produzione d'energia termica sia per il riscaldamento dell'intero edificio sia per l'acqua calda sanitaria dello stesso. Il vettore termico impiegato è l'acqua, l'apparecchio è per questo dotato di uno scambiatore di calore collegato all'impianto di distribuzione dell'edificio, spesso già esistente.

Funzionamento
Il funzionamento delle caldaie a legna si basa quasi unicamente sul principio dei focolari a fiamma inferiore o rovesciata (figura 2.2.1).

Figura 2.2.1 *Caldaia a legna con focolare a fiamma rovesciata (sinistra) e laterale (destra)* [1]



Il vano di carico è riempito di legna in pezzi o più raramente anche con cippato grossolano. Solitamente le caldaie con potenza nominale 20-40 kW hanno un vano con una capacità di carico di ca. 30-50 kg.

L'aria comburente è fornita attraverso un ventilatore che lavora in aspirazione oppure (più raramente) in immissione, perciò l'apparecchio lavora rispettivamente o in depressione o in sovrapressione. Le caldaie a tiraggio naturale sono oggi sempre meno frequenti e si collocano nelle fasce di taglia più piccole. La presenza del ventilatore offre il doppio vantaggio che il focolare può lavorare in modo indipendente dalle condizioni esterne (ad es. tiraggio del camino) e che l'eventuale perdita di pressione nel focolare è più facilmente superabile. Tali perdite sono causate dal cambio e rinnovo dell'aria, necessari per ottenere una migliore mescolanza tra aria comburente e gas combustibili (turbolenza).

Agli impianti termostaticamente regolabili, ovvero in grado di fornire una potenza termica adattabile alle richieste dell'utenza, sono sempre più spesso applicati, sui gas di scarico, dei sensori attraverso i quali è regolata l'immissione di aria comburente (numero di eccesso d'aria, CO, C_nH_m). Tali sistemi di regolazione influenzano positivamente anche il rendimento della caldaia che oggi raggiunge spesso valori superiori al 90%. Nelle caldaie a legna sono possibili carichi di potenza parziale fino a ca. il 50% della potenza nominale; tuttavia, l'installazione di un accumulatore *(puffer)*, che consente di equilibrare le oscillazioni tra richiesta e produzione di calore, è assolutamente raccomandabile.

Dispositivi di sicurezza

I due più importanti dispositivi di sicurezza delle caldaie a legna sono:

- il controllo della **porta del vano di carico** della legna per impedire la fuoriuscita dei gas (ad es. con sportelli a contatto collegati ad un comando con i ventilatori dei gas di scarico);
- la chiusura del sistema idraulico attraverso una **valvola di scarico termico** della caldaia, ovvero un dispositivo meccanico che in caso di surriscaldamento, segnalato qualora si raggiunga una temperatura dell'acqua di 95 °C, apre una valvola che scarica l'eccesso di calore dal sistema idraulico.

Requisiti tecnici di una moderna caldaia a legna

- Potenza e combustione regolabili
- Bassi livelli d'emissioni nocive a potenza nominale (modelli certificati):
  - CO: ≤ 250 mg/Nm^3 (13% O_2)
  - Polveri: ≤ 50 mg/Nm^3 (13% O_2)
- Rendimento (η_k) ≥ 90%
- Facile pulizia dello scambiatore, manuale (leva meccanica) o automatica (turbolatori), oppure attraverso una buona accessibilità allo scambiatore
- Sistema di regolazione dell'aria comburente sui gas di scarico
- Modulazione della potenza nel campo 50-100%
- Facile e confortevole rimozione delle ceneri, autonomia 2-4 settimane

Campi di applicazione

Le caldaie a legna trovano impiego principalmente in edifici che richiedono una potenza termica fino a ca. 50-60 kW; recentemente, con l'aumento della presenza di case a basso consumo, sono disponibili caldaie a legna con potenze inferiori a 10 kW.
Negli ambiti industriali trovano impiego caldaie a legna di maggiore taglia (fino a ca. 250 kW), che sono alimentate tipicamente con gli scarti legnosi dei processi di lavorazione. In questo caso oltre che con la legna in pezzi il vano di carico è riempito anche con scarti legnosi sfusi (trucioli, cippato grossolano, ecc.).

Caricamento della caldaia

Le caldaie di più piccola taglia sono alimentate attraverso una porta frontale oppure attraverso uno sportello superiore. Il riempimento frontale è spesso preferito dagli operatori; in questo caso, avendo una porta relativamente piccola, è minore il rischio di fuoriuscita di gas residui nel vano tecnico. Tuttavia, con il caricamento superiore si riesce a riempire completamente il vano di carico, perciò nelle caldaie di maggiore potenza e in quelle alimentabili con spacconi di legna da un metro, si applica quasi esclusivamente il sistema di carico dall'alto.
Molti produttori offrono caldaie alimentabili con legna da un metro a partire da 45 kW; in questo caso si riduce sensibilmente il lavoro dedicato al depezzamento della legna e quindi il suo costo. Sul mercato si trovano anche caldaie a legna, nel range di potenza 25-45 kW, con sistema di caricamento automatico della legna, sebbene la loro diffusione rimanga molto limitata (www.hobag.ch).

Tiraggio forzato

Ad eccezione degli apparecchi a tiraggio naturale, le caldaie a legna sono dotate di un ventilatore attraverso il quale il focolare può essere fornito di aria comburente e regolato indipendentemente dal tiraggio del camino.

Il ventilatore può immettere o aspirare l'aria; nel primo caso è montato frontalmente sull'apparecchio e produce una sovrapressione, mentre nel secondo caso è installato sulla parte iniziale della canna fumaria e produce all'interno dell'apparecchio una depressione. Questo consente anche di assicurare, in modo molto semplice e poco dispendioso, la mancata fuoriuscita di gas residui durante le cariche successive per mezzo di un dispositivo che, nel momento dell'apertura della porta di carico, aumenta i giri del ventilatore favorendone la loro aspirazione. Occasionalmente il ventilatore è collegato attraverso la porta di carico ad un'apertura di aspirazione supplementare oppure ad un dispositivo di chiusura automatica del canale dell'aria primaria. Nei focolari con ventilatore ad immissione invece, nel momento della carica successiva, un dispositivo interrompe il ventilatore e si apre un by-pass collegato alla canna fumaria che scarica la sovrapressione.

Nei luoghi in cui non è possibile il collegamento alla rete elettrica pubblica (es. baite e rifugi) sono installate caldaie a tiraggio naturale. Anche questi apparecchi sono stati molto migliorati nel tempo e attraverso speciali accorgimenti attuati sullo scambiatore sono state ridotte le perdite di tiraggio.

Scambiatore di calore

Le caldaie a legna solitamente montano scambiatori di calore verticali a tubi di fumo attraverso i quali sono convogliati i gas caldi che scambiano il calore con il vettore termico posto al loro interno, ovvero l'acqua. Alcuni modelli montano invece degli scambiatori a piastre. Nelle caldaie a legna si trovano per lo più scambiatori a 1-2 giri di fumo. Gli scambiatori verticali richiedono più spazio ma consentono una più facile e confortevole pulizia poiché le polveri che si staccano autonomamente o durante l'operazione di pulizia cadono direttamente nel sottostante contenitore delle ceneri. Nei tubi di fumo sono spesso inseriti dei turbolatori, ovvero delle spirali che rendono più costante i tempi di permanenza dei fumi caldi e rallentandoli favoriscono il contatto delle parti più calde del flusso dei gas con lo scambiatore, migliorando così il rendimento dell'apparecchio.

I turbolatori sono collegati assieme da un dispositivo meccanico che consente il loro movimento verticale lungo i tubi di fumo, fungendo così anche da sistema di pulizia meccanica dello scambiatore che può essere azionato automaticamente oppure manualmente per mezzo di una leva esterna.

Regolazione

La regolazione deve agire sulle tre fasi che caratterizzano il corso della combustione della carica di legna:

(1) fase di avvio

(2) fase stazionaria (potenza termica costante)

(3) fase di spegnimento.

Nella fase d'avvio la temperatura di lavoro desiderata non è ancora stata raggiunta, perciò può avvenire una maggiore emissione di sostanze incombuste (CO e C_nH_m). Nella fase stazionaria invece si raggiunge la temperatura di lavoro grazie all'immissione di aria comburente che consente di ottenere anche una fase di spegnimento controllata. Nella fase di spegnimento, quando si forma il carbone di legna residuo, sia la potenza che la temperatura si abbassano e possono nuovamente aumentare i gas incombusti. A differenza della fase d'avvio, durante la fase finale della combustione si rileva per lo più un aumento del CO proveniente dalla gassificazione del carbone di legna mentre gli idrocarburi carboniosi rimangono bassi poiché la componente volatile risulta ormai pressoché esaurita.
Nelle caldaie manuali la quantità di carica fornita all'apparecchio caratterizza in gran parte la potenza e la regolazione della combustione. In questo caso la richiesta di aria primaria e secondaria continua fino a quando si raggiunge una separazione dei due flussi d'aria comburente. Con l'aria primaria è influenzata la quota di gas estratti - e quindi la potenza termica - mentre con l'aria secondaria è controllata la completa ossidazione dei gas combustibili.
I più importanti concetti di regolazione delle caldaie a legna manuale perseguono i seguenti obiettivi:

- Influenzare la potenza del focolare, generalmente per ottenere un prolungamento del tempo di combustione
- Ottimizzare le condizioni di combustione nel corso delle tre fasi
- Integrare nel sistema di distribuzione un accumulatore di calore inerziale.

A seconda delle possibilità e delle modalità di regolazione, le caldaie si distinguono in: caldaie a pieno carico, caldaie a potenza regolabile e caldaie a potenza e combustione regolabili.

Caldaie a pieno carico (a potenza non regolabile)
Sono le caldaie a tiraggio naturale prive quindi di un ventilatore di tiraggio forzato. La produzione di calore dipende principalmente dalla quantità d'aria fornita in modo naturale dal tiraggio del camino e dalla relativa posizione delle prese d'aria che forniscono l'aria primaria e secondaria. Queste caldaie lavorano alla potenza nominale senza possibilità di modulazione, quindi, poiché il fabbisogno di calore durante l'anno solo raramente richiede la potenza nominale, il surplus di calore deve essere accumulato in un *puffer* intermedio idoneamente dimensionato.

Caldaie a potenza regolabile
Queste caldaie dispongono di un ventilatore (in aspirazione o immissione) che consente di dosare in modo specifico la fornitura di aria primaria a seconda del fabbisogno di potenza. Questo si verifica o attraverso la variazione del numero di giri del ventilatore o attraverso le prese d'aria nei canali d'areazione. Quale parametro di regolazione è impiegata principalmente la differenza tra il valore reale e quello teorico della temperatura della caldaia. Anche queste caldaie dovrebbero quanto più possibile lavorare a potenza nominale, poiché in tale stadio si verificano le più favorevoli condizioni per la combustione e quindi i più bassi livelli di emissioni nocive. Per questo motivo è assolutamente

raccomandabile, anche in tal caso, l'installazione di un accumulatore idoneamente dimensionato. A seconda dello stato di carico dell'accumulatore, rilevato per mezzo di una sonda di temperatura, è regolata e quindi adattata la potenza della caldaia. La possibile riduzione della potenza nominale (modulazione) nelle caldaie a legna è di ca. il 50% della potenza nominale.

Caldaie a potenza e combustione regolabili

In aggiunta alla potenza può essere regolata anche la qualità della combustione. Nel caso più semplice è impiegato come parametro di regolazione la temperatura dei gas di scarico, attraverso la quale la combustione è regolata agendo sulla quantità d'aria comburente oppure sulla proporzione tra aria primaria e secondaria. Negli apparecchi dotati dei più evoluti sistemi di regolazione sono impiegati sensori di rilevazione della temperatura di combustione, sonda Lambda e sensori di rilevazione del CO, per mezzo dei quali è regolata la quantità d'aria primaria e secondaria immessa oppure la quantità di aria primaria e il numero di giri del ventilatore di tiraggio.

Attraverso questi sistemi di regolazione in continuo, queste caldaie sono in grado di esprimere una potenza parziale pari al 50% di quella nominale e di garantire, anche a carico parziale, ottimi gradi di rendimento e bassi livelli di emissioni nocive. Anche per queste caldaie più evolute l'installazione di un accumulatore è sempre raccomandabile a causa dell'ampia variabilità della richiesta di calore che si verifica tipicamente durante la stagione termica.

2.3 Accumulatore di calore e collegamenti idraulici

Per ottenere un'elevata qualità della combustione, la caldaia a legna a caricamento manuale deve lavorare quanto più possibile al più elevato carico termico. Tuttavia, durante la stagione termica la massima potenza è richiesta solo per pochi giorni all'anno. Per questo motivo il calore prodotto da queste caldaie non è quasi mai quello richiesto momentaneamente dall'impianto termico. Sulla base di queste considerazioni, l'installazione di un accumulatore di calore inerziale è sempre indispensabile, perché consente di immagazzinare il calore al momento non necessario. Inoltre l'installazione di un idoneo volume di accumulo può rendere molto più confortevole la gestione dell'impianto.

Vantaggi dell'accumulatore

- Ottimizza la combustione e allunga la vita alla caldaia
- Assorbe i picchi di richiesta termica
- Consente di programmare il riscaldamento per le prime ore del mattino
- Riscaldamento per 1-2 giorni nelle mezze stagioni con una sola carica
- Acqua sanitaria per 4-5 giorni d'estate con una sola carica
- Facile integrazione con il solare termico

Funzionamento

Non appena la caldaia raggiunge la potenza minima, a causa dell'abbassamento della richiesta di calore, il fuoco si spegne attraverso l'interruzione dell'aria e del combustibile, oppure la quantità di calore in eccesso deve essere immagazzinata in un accumulatore che funge quindi da tampone *(puffer)*. Diversamente la temperatura dell'acqua continuerebbe a salire fino ad attivare i dispositivi di sicurezza della caldaia.

L'accumulatore è un serbatoio d'acciaio termicamente isolato attraversato dalla circolazione del vettore termico (l'acqua) durante le fasi di caricamento e di prelievo del calore. Attraverso appositi dispositivi di immissione (scambiatori), l'afflusso d'acqua calda nella parte alta del *puffer* avviene in modo tale da minimizzare la turbolenza, ottenendo una stratificazione della temperatura al suo interno; si tratta dei cosiddetti accumulatori a stratificazione. Qui l'afflusso dell'acqua di ritorno dal sistema di riscaldamento entra per lo più attraverso delle condutture ascendenti laminari nelle diverse zone di temperatura.

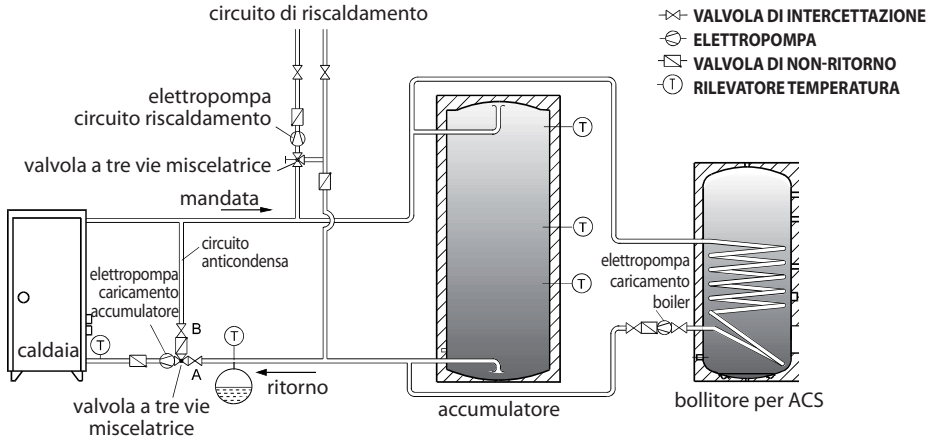
Tipi di accumulatori

Sul mercato sono disponibili diversi tipi di accumulatori, a seconda che il bollitore sanitario sia separato oppure integrato nell'accumulatore o che si tratti di un accumulatore che consente l'interazione con il solare termico. Nel caso di un accumulatore combinato (con bollitore integrato) la capacità di accumulo è ridotta a causa della presenza del volume dedicato al sanitario. Nel caso di luoghi di difficile accesso sono disponibili anche accumulatori smontabili assemblabili sul posto. I sistemi di regolazione e di interfaccia tra accumulatore, bollitore ed eventualmente solare termico sono generalmente preassemblati e offerti dagli stessi produttori delle caldaie.

Collegamento idraulico

La figura 2.3.1 mostra un tipico schema idraulico di collegamento tra la caldaia a legna, l'accumulatore e il circuito di distribuzione del calore nell'abitazione. Nella fase di accensione inizialmente il circuito di riscaldamento è chiuso con la valvola del ritorno (valvola A chiusa, valvola B aperta), per consentire di raggiungere quanto più rapidamente la temperatura di lavoro (ca. 60 °C nel ritorno della caldaia). Non appena la valvola A si apre l'acqua calda fluisce sia nel circuito di riscaldamento che nel boiler. Nel momento in cui il circuito di riscaldamento inizia a non richiedere più calore, comincia il caricamento dell'accumulatore. La pompa di circolazione riduce la pressione di flusso così che l'eccesso di volume tramite la pompa di carico dell'accumulo deve defluire nel *puffer*. Non appena l'immissione di calore dalla caldaia si arresta (ad es. con temperatura dei gas di scarico inferiore ai 60°C), si chiudono entrambe le valvole (A e B). Mentre la pompa di carico dell'accumulatore è disinserita, la pompa del circuito di riscaldamento può invertire la direzione del flusso nell'accumulatore e prelevare il calore dalla parte superiore del *puffer*.

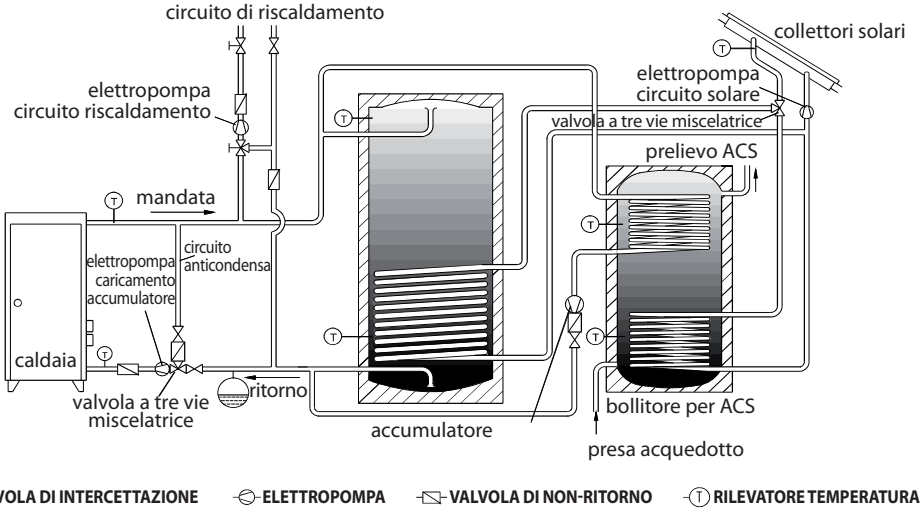
Figura 2.3.1 *Schema idraulico di collegamento tra caldaia, puffer e circuito di riscaldamento* [1]



Combinazione con il solare termico

I sistemi di riscaldamento a legna sono sempre più spesso combinati con i collettori solari, principalmente per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) e nei sistemi a bassa temperatura anche di acqua calda per il riscaldamento. In tal caso sono necessari particolari accumulatori con scambiatori di calore aggiuntivi e con la possibilità di essere allacciati a più circuiti. Proprio nel caso della combinazione con il solare termico sono particolarmente impiegati gli accumulatori a stratificazione. In questo caso, per la messa a disposizione d'acqua calda, sono spesso impiegate delle stazioni che riscaldano l'acqua sanitaria per mezzo di uno scambiatore a piastre. Questa è una forma molto igienica di preparazione dell'ACS. La figura 2.3.2 riporta uno schema semplificato di collegamento idraulico.

Figura 2.3.2 *Schema di collegamento idraulico con integrazione solare* [1]



Dimensionamento dell'accumulatore

Il volume dell'accumulatore è funzione dei seguenti fattori:

- Campo di potenza della caldaia (carico parziale)
- Volume del vano di carico della legna
- Potenza nominale
- Tipo di legna
- Effettiva differenza di temperatura nell'accumulatore
- Aspettativa di comfort nella gestione

Le caldaie che lavorano principalmente alla potenza nominale hanno bisogno di maggiori volumi di accumulo rispetto alle caldaie in grado di lavorare a carico variabile, le quali producono minori surplus di calore grazie all'adattamento del carico termico.
Grossi volumi di accumulo sono anche necessari nel caso di caldaie con grandi vani di carico della legna che per ogni carica producono un'elevata quantità di calore. Indicativamente, prendendo come riferimento la sola potenza della caldaia, nelle caldaie a legna sono raccomandabili almeno 55 litri/kW installato, ma sarebbe preferibile raggiungere i 100 l/kW. Questo vale anche per le caldaie a legna in grado di modulare la potenza, che in ogni caso dovrebbero lavorare il più possibile nei pressi della potenza nominale, per minimizzare l'emissione di sostanze nocive.
Gli accumulatori di calore provocano una perdita continua, anche se molto limitata, di calore che si ripercuote sul rendimento annuo dell'impianto; essi dovrebbero perciò – quando possibile – essere collocati in parti riscaldate dell'edificio. Il dimensionamento dell'accumulatore dovrebbe essere effettuato secondo la formula definita dalla norma UNI EN 303-5:

$$\mathbf{V_{Sp} = 15 \times T_B \times Q_N \times (1 - 0{,}3 \times Q_h/Q_{min})}$$

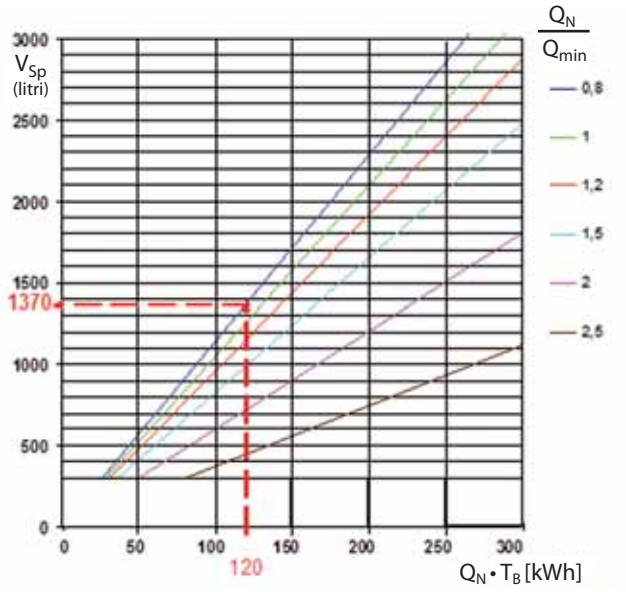
V_{Sp} Capacità del serbatoio [l]
T_B Periodo di combustione [h]
Q_N Potenza termica nominale [kW]
Q_{min} Potenza termica minima [kW]
Q_h Carico di riscaldamento medio edificio [kW]

Esempio - Casa monofamiliare

T_B 6 h (legno duro)
Q_N 20 kW
Q_{min} 10 kW (50% potenza nominale)
Q_h 8 kW ca. 180 m² (Edificio nuovo)

15 x 6 x 20 x (1 - 0,3 x 8/10) = 1.368
L'impianto richiede un *puffer* di ca. 1500 litri

Il grafico seguente indica la variazione del volume inerziale in funzione dei kWh erogati dal carico di legna lungo le varie rette del rapporto fra il carico di riscaldamento medio dell'edificio e la potenza termica minima, la quale corrisponde al 50% della potenza nominale del generatore.



Contenuto di calore degli accumulatori

La capacità di accumulo di calore – quindi il volume necessario dell'accumulo – dipende dalla differenza di temperatura tra circuito dell'accumulatore e circuito del riscaldamento (secondo la direzione di miscelazione del circuito di riscaldamento). Lo scarico dell'accumulatore termina quindi appena la temperatura di prelievo scende sotto la temperatura del circuito di riscaldamento. La differenza di temperatura tra l'accumulo a massimo carico e il circuito di riscaldamento è, a seconda della configurazione del sistema di riscaldamento, tra 25 e 50°C.

La capacità utilizzabile dell'accumulo è anche dipendente dalla temperatura del circuito di riscaldamento. Nei sistemi di riscaldamento a bassa temperatura (a pavimento o parete) vi è quindi nel *puffer* più calore utile a disposizione. In termini indicativi, con una differenza di temperatura di 40 °C e un volume del puffer di 100 litri/kW è possibile ottenere una potenza a pieno carico per 4,6 ore e una potenza parziale (50%) per 9,2 ore, senza che la caldaia a legna entri in funzione.

Approssimativamente, metà del carico termico accumulato nel puffer è sufficiente a coprire il fabbisogno termico di una notte di riscaldamento.

Dispositivo anticondensa

L'impianto idraulico delle caldaie a legna (cippato e pellet) deve essere sempre provvisto di un dispositivo anticondensa. Esso consiste di un collegamento idraulico tra mandata e ritorno che consente di miscelare i due circuiti in modo da garantire che la temperatura del ritorno non scenda al di sotto dei 60 °C. In questo modo sono minimizzati i fenomeni di condensa che possono compromettere la vita utile della caldaia. Sul ritorno è raccomandabile installare un termometro per rilevare la temperatura dell'acqua prima dell'ingresso in caldaia e controllare quindi la corretta funzionalità del dispositivo anticondensa.

Elettropompa di circolazione

È molto importante che l'elettropompa di circolazione sia ben dimensionata. Ancora troppo spesso si osservano pompe sovradimensionate che sono causa di elevati consumi elettrici dell'impianto (§ 4.4). Inoltre l'elettropompa, in presenza di una rete di distribuzione, dovrebbe essere dotata di *inverter*, ovvero di un apparato elettronico in grado di regolare la velocità del numero di giri del motore elettrico e rendere così modulabile la pompa stessa.

2.4 Caldaie a caricamento automatico

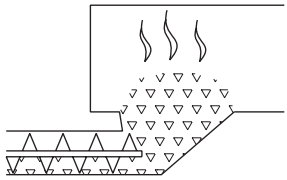
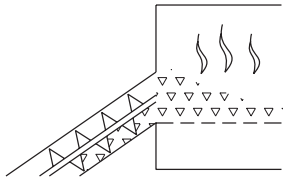
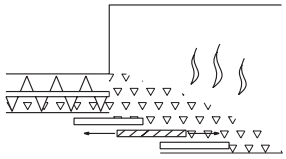
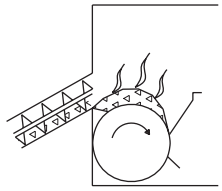
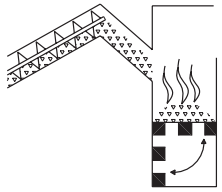
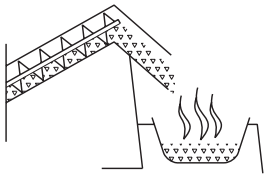
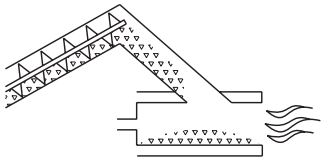
2.4.1 Tipologie di focolari

Le caldaie di piccola-media taglia appartengono alla tecnica di combustione cosiddetta a griglia *(Festbettfeuerungen, fixed bed combustion)* e nell'ambito di questo raggruppamento si distinguono diversi tipi di focolare che sono ottimizzati per l'impiego di specifici biocombustibili. In questo senso, i combustibili spesso non sono intercambiabili l'uno con l'altro. Per esempio le caldaie a cippato sono sì in linea di principio alimentabili con pellet di legno, tuttavia non può avvenire il contrario; anche le caldaie adatte all'impiego di miscanto possono essere alimentate con cippato di legno ma anche in questo caso non vale il contrario.

La tabella 2.4.1 illustra i più comuni tipi di focolari di piccola-media potenza e i relativi biocombustibili solidi impiegabili. Nella tabella sono distinti i focolari sotto-alimentati e a caricamento laterale (con coclea e/o spintore), per lo più alimentati a cippato e/o pellet, dai focolari per caduta dall'alto, tipicamente impiegati solo nelle caldaie a pellet (o cippato calibrato).

Nell'ambito del mercato degli impianti medio-piccoli a cippato, ca. il 70% delle caldaie sono del tipo con focolare a griglia, ca. il 25% sono sottoalimentati e ca. il 10% sono caldaie ad alimentazione laterale senza griglia con fondo a spinta. Ulteriori varianti sviluppate sono la griglia rotativa, a ribaltamento e a rullo. Questi sviluppi mirano ad ottenere lo scuotimento del letto di braci e così un miglioramento del processo di combustione nella sua fase finale e di rimozione delle ceneri dalla griglia. Tali dispositivi sono particolarmente efficaci quando si impiegano combustibili con elevato contenuto di cenere e basso punto di fusione delle ceneri (scorie), come ad es. pellet di vite, pellet di miscanto, cereali energetici (triticale), cippato di pioppo, cippato da potature. Il mercato richiede in modo crescete questo tipo di caldaie [5].

Tabella 2.4.1 *Classificazione dei principali focolari automatici* [1, modificato]

Principio	Tipo	Schema	Potenza nominale	Combustibile
Focolare sottoalimentato			da 10 kW (fino a 2,5 MW)	cippato pellet
Focolari a griglia alimentati lateralmente (coclea o spintore)	griglia fissa (con raccoglitore cenere o griglia ribaltabile)		da 25 kW	cippato pellet
	griglia mobile (rotativa, a scalini)		da 15 kW (fino > 20 MW)	cippato pellet corteccia segatura
	griglia a rullo laminato		da 4 kW (fino a 450 kW)	cippato pellet
Focolari alimentati per caduta	griglia ribaltabile		da 15 kW (fino a 30 kW)	pellet (cippato calibrato)
	braciere a tazza		da 6 kW (fino a 30 kW)	pellet
	braciere a tunnel (bruciatore)		da 10 kW	pellet

2.4.2 Caldaie sottoalimentate

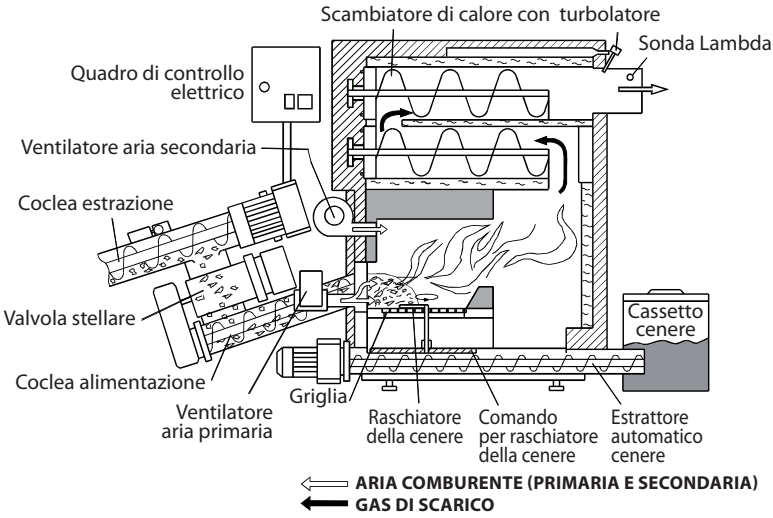
In questi apparecchi una coclea alimenta la bocca del focolare da sotto (tabella 2.4.1). Una parte dell'aria comburente è immessa come aria primaria nella bocca del focolare. In questa zona avvengono le fasi di essiccazione, decomposizione pirolitica e gassificazione del combustibile così come la combustione finale del carbone di legna. Per la completa ossidazione dei gas combustibili, l'aria secondaria è immessa nella seconda camera di combustione, dove è mescolata con i gas combustibili. Subito dopo i gas caldi cedono il calore all'acqua in corrispondenza dello scambiatore prima di essere liberati in atmosfera attraverso la canna fumaria. Con questo tipo di focolare può essere impiegato cippato con contenuto idrico nel range 5-50%. Lo spazio del focolare e l'adiacente seconda camera di combustione devono essere adattati alla qualità del combustibile, in particolare il suo contenuto idrico, per evitare mal funzionamenti e blocchi tecnici dell'apparecchio. Per esempio, impiegando in un impianto costruito per l'utilizzo di cippato fresco (M 50%), del cippato molto secco, nel focolare si possono raggiungere temperature eccessivamente elevate che possono provocare problemi sui materiali costruttivi e la formazione di scorie di fusione.

Le caldaie sottoalimentate sono idonee all'uso di cippato povero di cenere e con pezzatura molto regolare (P16, P45), essendo il focolare alimentato da una coclea. In tali caldaie può essere impiegato pellet mentre va esclusa la possibilità di usare corteccia o miscanto (erbacee).

2.4.3 Caldaie ad alimentazione laterale

Il combustibile è introdotto lateralmente nel focolare con l'ausilio o di una coclea o di uno spintore. Nel caso di cippato molto grossolano o di triturato è sempre raccomandabile l'impiego di uno spintore idraulico per l'alimentazione del focolare (figura 2.4.3.5). In questo tipo di caldaie sono molto diffuse quelle che presentano una griglia fissa, (figura 2.4.3.1), spesso dotate di un estrattore automatico delle ceneri oppure di una griglia ribaltabile autopulente (figure 2.4.3.2 e 2.4.3.3).

Figura 2.4.3.1 *Esempio di una caldaia da 50 kW a cippato (www.heizomat.de) ad alimentazione laterale con griglia fissa ed estrazione automatica delle ceneri*



Caldaie a griglia fissa

Nelle caldaie ad alimentazione laterale a griglia fissa l'**aria primaria** è immessa attraverso i fori della griglia e attraverso degli iniettori posti nella parte laterale che delimita il focolare. L'aria primaria adempie anche ad una funzione di raffreddamento della griglia; questo riduce il rischio della formazione di scorie di fusione e di surriscaldamento dei materiali costruttivi, in particolare quando si impiegano combustibili più critici del legno (miscanto, cereali).

L'**aria secondaria** è immessa al di sopra della griglia, ovvero del letto di braci, oppure davanti all'ingresso della seconda camera di combustione. Le **ceneri** prodotte cadono in un cassetto posto al di sotto della griglia oppure nel caso di impiego di combustibili ricchi di cenere possono essere estratte con una coclea che le trasporta in un più ampio contenitore.

Figura 2.4.3.2 *Caldaia a cippato (20-200 kW) ad alimentazione laterale con griglia ribaltabile (www.eta-italia.it) ed estrazione automatica delle ceneri*

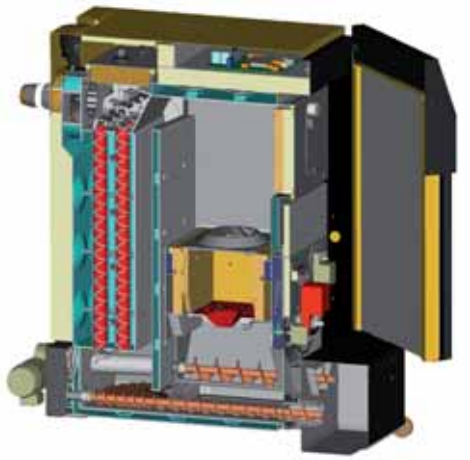
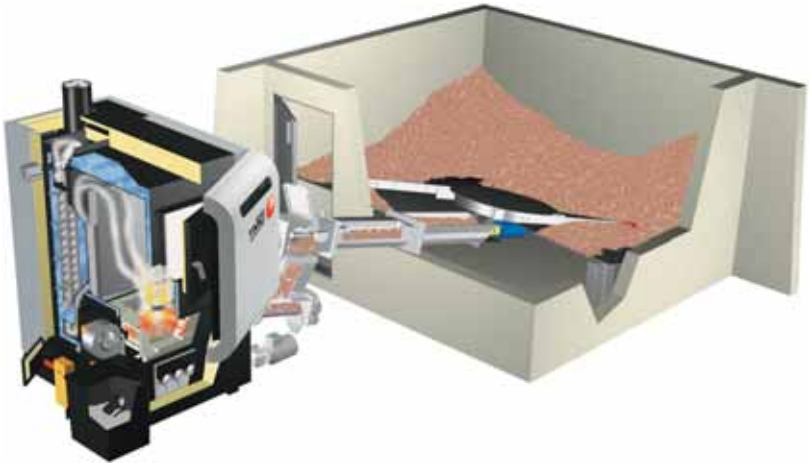


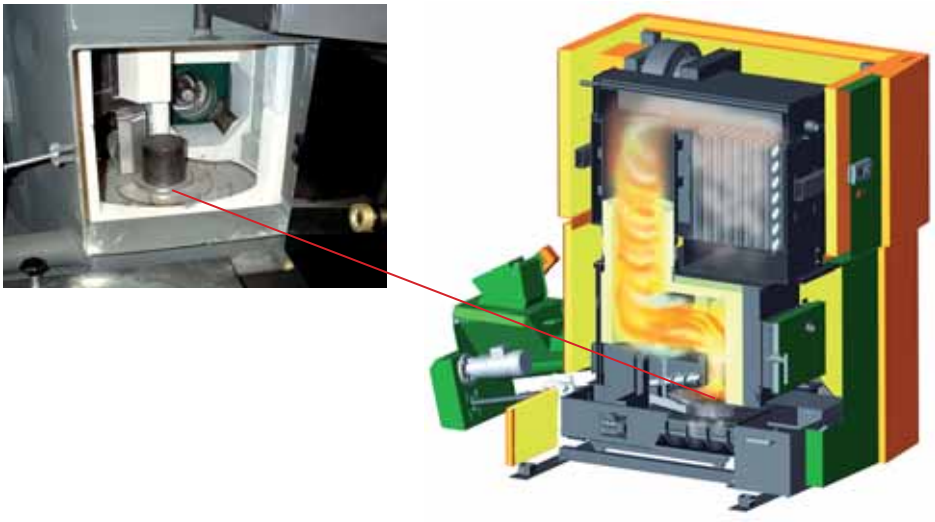
Figura 2.4.3.3 *Caldaia a cippato (8-100 kW) ad alimentazione laterale con griglia vibrante e autopulente (www.froling.it)*



Caldaie a griglia mobile

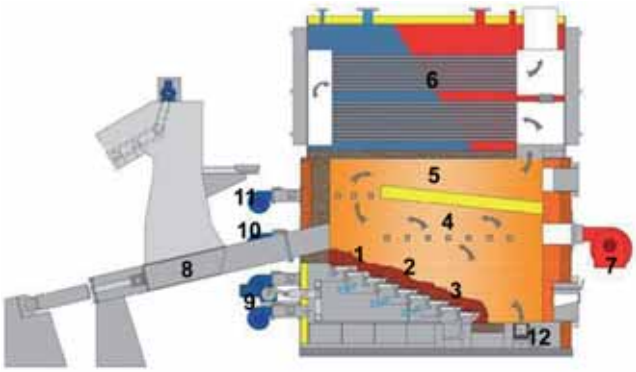
Sono generatori di potenza medio-grande da ca. 100 kW fino ad alcuni MW, impiegati sia nel residenziale che nel settore industriale. La griglia è composta di elementi mobili (piatti, scalini) che favoriscono l'avanzamento del cippato lungo un piano inclinato o una **griglia rotativa** (figura 2.4.3.4). Il focolare mobile è adatto all'impiego di cippato umido (M 40-50%) con elevato contenuto di cenere (A 1,5-3).

Figura 2.4.3.4 *Caldaia a cippato da 150 kW ad alimentazione laterale con griglia mobile-rotativa e camera secondaria con flusso rotativo dei gas combustibili (www.kwbitalia.it)*



Nei focolari **mobili inclinati** (figura 2.4.3.5) gli scalini si muovono in senso orizzontale avanti-indietro, spostando gradualmente in avanti il cippato lungo il piano inclinato. La caldaia è dotata di numerosi e complessi dispositivi che garantiscono un'omogenea distribuzione del cippato e del letto di braci sopra l'intera superficie della griglia. Questo aspetto è particolarmente importante per garantire un apporto d'aria primaria equamente distribuita sulla superficie della griglia. Diversamente, possono crearsi scorie di fusione, un'elevata presenza di ceneri volatili e un troppo elevato eccesso d'aria. Il trasporto del cippato sopra la griglia deve essere quindi "tranquillo" e omogeneo per formare un letto uniforme, privo di soluzioni di continuità che potrebbero formare zone di materiale incombusto. Gli stadi della combustione avvengono generalmente in tre sezioni separate della griglia, perciò l'aria primaria (sotto griglia) e la velocità della griglia sono modulanti. La griglia può essere dotata di un sistema di raffreddamento ad acqua per minimizzare i fenomeni di fusione delle ceneri che disturbano il processo di combustione e possono compromettere la vita utile dei materiali costruttivi, in particolare del refrattario. Gli stadi della combustione sono ottenuti separando la zona di combustione primaria da quella secondaria per evitare rimescolamenti dell'aria secondaria e per separare le zone di gassificazione e ossidazione. Tanto più efficace è il mescolamento tra aria secondaria e gas combustibili, tanto più basso sarà l'eccesso d'aria necessario a completare la combustione e quindi più efficiente sarà il processo di combustione stesso [10].

Figura 2.4.3.5 *Caldaia a cippato da 700 kW a griglia mobile inclinata con alimentazione laterale a spintore (www.uniconfort.com)*



1. ZONA DI ESSICAZIONE
2. ZONA DI GASSIFICAZIONE
3. ZONA DI OSSIDAZIONE
4. CAMERA PRIMARIA
5. CAMERA SECONDARIA
6. SCAMBIATORE
7. BRUCIATORE AUSILIARIO
8. SPINTORE IDRAULICO
9. VENTILATORI ARIA PRIMARIA
10. VENTILATORI ARIA SECONDARIA
11. VENTILATORI ARIA TERZIARIA
12. COCLEA ESTRAZIONE CENERE

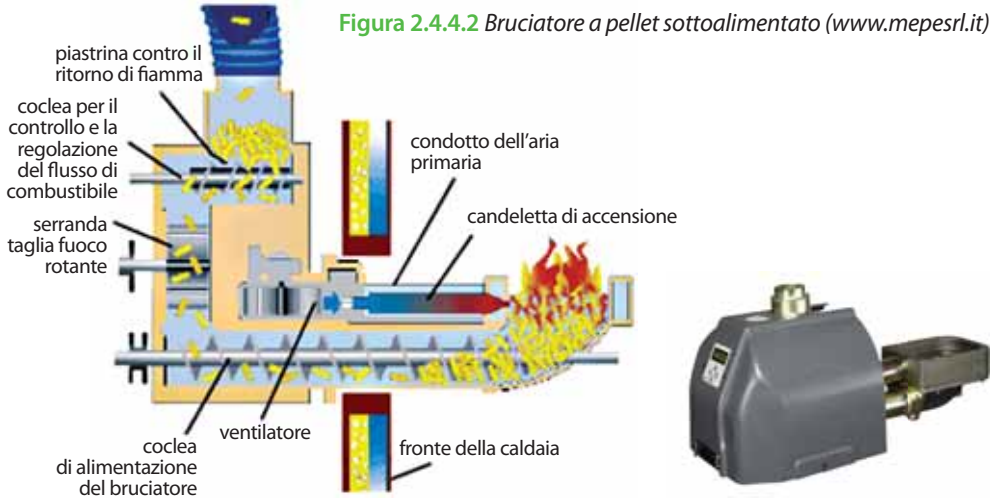
2.4.4 Caldaie con focolare a caduta

Il pellet, oltre che nelle caldaie sottoalimentate, è diffusamente impiegato negli apparecchi con focolare "a caduta". Le varianti costruttive sono state messe a punto in modo specifico per il pellet, pertanto questi focolari non sono idonei all'uso del cippato. Nei focolari a caduta il pellet, condotto da una coclea di alimentazione, è fatto cadere dall'alto sul letto di braci che poggia su una griglia ribaltabile o un braciere a tazza o "a tunnel" (bruciatore). Qui sono immesse l'aria primaria e secondaria, da sotto e lateralmente attraverso i fori d'iniezione (figura 2.4.4.1). Nel braciere ribaltabile le ceneri sono scaricate in modo automatico periodicamente (ad es. ogni 16 ore) nel raccoglitore sottostante. Per assicurare inoltre che i depositi di cenere siano completamente rimossi dalla griglia ribaltabile, questa urta contro una piastra pulente verticale in corrispondenza del raccoglitore delle ceneri.

Figura 2.4.4.1
Caldaia a pellet con alimentazione a caduta del focolare e braciere a tazza (www.windhager.it)

I **bruciatori a pellet** possono essere anche offerti come elementi aggiuntivi che, similmente ai bruciatori a metano o gasolio, possono essere applicati ad una caldaia esistente, la cui trasformazione è perciò particolarmente agevole.
I bruciatori a pellet possono essere sottoalimentati (figura 2.4.4.2) oppure sono impiegati i bruciatori a tunnel nei quali i pellet cadono sul condotto di combustione (tunnel) mentre l'aria comburente entra orizzontalmente e fa sviluppare la fiamma all'interno del corpo della caldaia.

Figura 2.4.4.2 *Bruciatore a pellet sottoalimentato (www.mepesrl.it)*


piastrina contro il ritorno di fiamma
coclea per il controllo e la regolazione del flusso di combustibile
serranda taglia fuoco rotante
condotto dell'aria primaria
candeletta di accensione
coclea di alimentazione del bruciatore
ventilatore
fronte della caldaia

Al momento è in corso un'attività di messa a punto di caldaie a pellet che, con determinati accorgimenti e modifiche sul braciere e la coclea di alimentazione, possono diventare adatte all'impiego di cippato calibrato (P8) commercializzato in sacchi da ca. 10 kg.
L'utilizzo nelle caldaie a pellet di altri combustibili sfusi di tipo agricolo, come ad esempio i cereali, i semi di oleaginose, ecc. a causa dell'elevato contenuto di cenere, dei bassi punti di fusione e dell'effetto corrosivo, dovuto ad un relativamente elevato contenuto di cloro, risultano essere ancora piuttosto problematici, in particolare per le applicazioni nei piccoli apparecchi di combustione. L'impiego di tali combustibili deve avvenire solo in apparecchi messi a punto in modo specifico per la loro corretta combustione.

2.4.5 Componenti delle caldaie automatiche e sistemi collegati

Accumulatore

Le caldaie centralizzate a cippato e a pellet generalmente sono in grado di lavorare ad una potenza parziale pari al 30% di quella nominale. Al di sotto di tale carico termico l'impianto lavora in modalità "accensione-spegnimento", ovvero il fuoco si spegne temporaneamente e poi viene automaticamente riacceso non appena la temperatura del circuito di riscaldamento scende al di sotto di un prefissato valore soglia. In linea di principio quindi, considerata la capacità di modulazione di potenza della caldaia, l'accumulatore può risultare non indispensabile. Tuttavia, spesso le caldaie automatiche lavorano a una potenza inferiore al 30% di quella nominale, livelli nei quali si verificano le condizioni più sfavorevoli della combustione (emissioni nocive), si abbassa il rendimento e possono manifestarsi fenomeni di condensazione nei gas di scarico. Come conseguenza la vita utile dell'apparecchio può essere ridotta, in particolare quando si fa uso di combustibili di bassa qualità. Installando un accumulatore si minimizza la frequenza delle fasi di "accensione-spegnimento" e si allunga il tempo di combustione, riducendo al minimo le condizioni di lavoro dannose per l'apparecchio. Indicativamente il volume dell'accumulatore dovrebbe essere dimensionato con ca. 20 litri per kW di potenza nominale della caldaia; in questo modo per portare il puffer a 40°C serve poco meno di un'ora di funzionamento della caldaia a piena potenza [1].

Scambiatore di calore e condensazione

A differenza delle caldaie a legna, nelle caldaie a cippato trovano anche impiego gli scambiatori orizzontali a tubi di fumo, poiché consentono di ottenere una più compatta conformazione dell'apparecchio. Essi sono principalmente da uno fino a tre giri di fumo. Per una confortevole pulizia bisogna assicurare una facile accessibilità dello scambiatore, che normalmente è sempre dotato di un sistema di pulizia automatica di tipo meccanico e nelle classi di potenza maggiore (> 500 kW) anche di sistemi pneumatici. Nel caso di impiego di biocombustibili solidi che favoriscono i fenomeni corrosivi, la vita utile dello scambiatore può essere fortemente ridotta; questo vale, in parte, anche per gli scambiatori di acciaio inossidabile. Con l'applicazione di uno scambiatore aggiuntivo dotato di separatore dei condensati, le caldaie possono essere convertite nelle cosiddette "caldaie a condensazione". Attraverso l'aggiunta del raffreddatore dei gas e del condensatore del vapore dei gas di scarico si può ottenere un aumento della potenza termica del 10-20%, a seconda del contenuto idrico e della temperatura del circuito di ritorno. Il rendimento della caldaia aumenta, perciò, oltre il 100% (riferito all'input energetico calcolato con il pcM del combustibile). Per assicurare un ottimale funzionamento della caldaia a condensazione bisogna garantire che il ritorno non superi la temperatura di 30-35°C (figura 2.4.5.1).

Il condensatore consente inoltre un ulteriore effetto positivo, ovvero la separazione delle polveri dal 20 fino al 37%. Nei modelli di caldaie più recenti alimentati a pellet (potenza < 30 kW) sono stati ottenuti valori di emissione delle polveri di 5 mg/MJ (7,7 mg/Nm^3) [11]. A seconda del contenuto idrico del legno si forma uno specifico volume di condensati che va da ca. 0,05 a 0,2 litri per kWh di energia termica prodotta dalla caldaia [1].

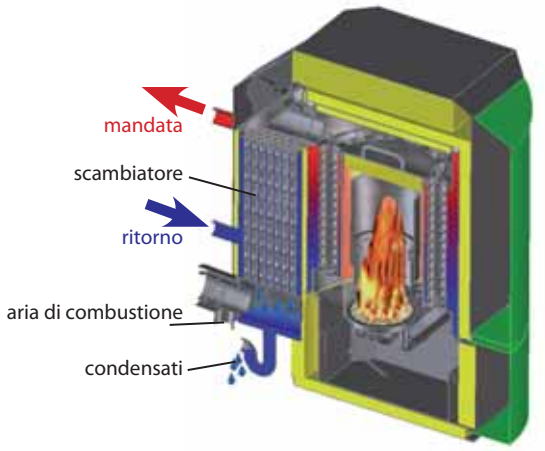


Figura 2.4.5.1 *Caldaia a pellet a condensazione (www.oekofen.it)*

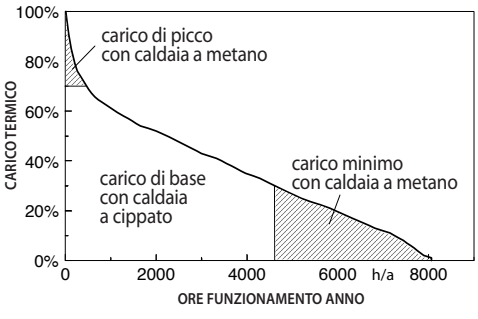
Combinazione con altre fonti di calore

Generalmente le caldaie a cippato e a pellet sono impiegate come uniche fonti di calore, utilizzate per tutto l'anno in modo completamente automatico. La combinazione di queste caldaie (automatiche) con una caldaia manuale a legna può in ogni caso essere sensata sia sul piano del comfort di gestione che su quello economico. Questa soluzione è spesso adottata per la combinazione legna-pellet; esistono diversi produttori che offrono sul mercato caldaie di tipo combinato (figura 2.4.5.2 e allegato).

Figura 2.4.5.2 *Caldaie combinate legna-pellet: a sinistra, da 15 fino a 30 kW (www.eta-italia.it); a destra da 25 kW (www.sht.at)*

Anche la combinazione con i combustibili fossili, in particolare il metano, può offrire dei vantaggi, per lo più nel caso di impianti di taglia medio-grande collegati ad una rete di teleriscaldamento. A livello progettuale, prevedendo di coprire i picchi di carico termico con una caldaia a metano si ottiene una riduzione dei costi di investimento e contemporaneamente si fa lavorare la caldaia a cippato nella zona di carico funzionalmente più favorevole (carico di base). In questo caso i due generatori di calore devono lavorare in parallelo, ovvero le singole potenze addizionate consentono di arrivare a coprire il carico termico massimo. Tuttavia, prevedendo di coprire il periodo di carico minimo con la caldaia a metano (es. produzione di ACS estiva), i due generatori non lavorano contemporaneamente ma in modo alternato; in tal caso risulta sensata l'installazione di un accumulatore correttamente dimensionato.
La combinazione cippato-metano consente di evitare o minimizzare le condizioni di lavoro a carico parziale o con carico particolarmente basso. Coprendo con la caldaia a metano i carichi di punta (invernali) e quelli minimi (estivi) si dà al generatore di calore a cippato il compito di fornire la più grande quota di calore richiesto, come illustrato nella tipica curva di carico termico (figura 2.4.5.3).

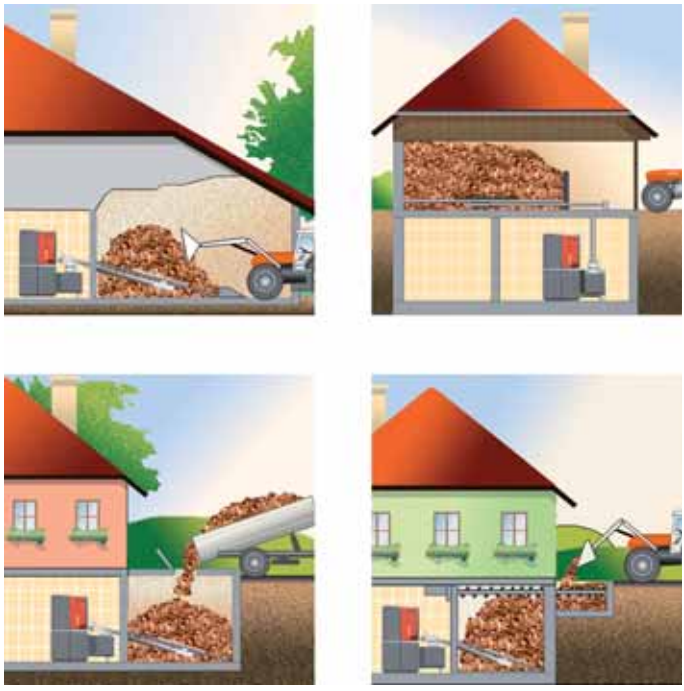
Figura 2.4.5.3 *Curva di carico termico annua con la combinazione cippato-metano sui carichi di punta e su quelli minimi* [1]. *Nella foto a destra un esempio di combinazione cippato-metano.*



2.4.6 Sistemi d'estrazione e d'alimentazione

Le caldaie automatiche dispongono di un sistema meccanico di alimentazione del combustibile dal silo. Questo avviene o attraverso un contenitore intermedio che è riempito periodicamente (pellet), oppure per mezzo di una coppia di coclee di alimentazione unite funzionalmente da un pozzetto di caduta o di carico.
Nel caso del cippato l'estrazione dal silo è disposta orizzontalmente o secondo un piano inclinato, in funzione di com'è realizzato l'accesso alle parti in movimento per la manutenzione e le riparazioni. La figura 2.4.6.1 illustra gli esempi applicativi più frequenti.

Figura 2.4.6.1 *Esempi di configurazione del sistema di estrazione e alimentazione del cippato (www.guntamatic.com)*



Il silo del cippato deve essere localizzato il più possibile vicino alla centrale termica. Molto diffusa è la soluzione con silo adiacente sotterraneo e scarico da sopra del cippato. Le soluzioni più economiche sono quelle nelle quali il deposito è ricavato da una stanza esistente oppure si crea su una platea in cemento una struttura esterna in legno adiacente al vano tecnico (figura 2.4.6.2). Sono anche disponibili sul mercato dei moduli mobili o dei container, composti sia dal vano tecnico che dal deposito del cippato. Il modulo è pre-assemblato in azienda (completo di caldaia e accessori idraulici ed elettrici) e trasportato presso l'utenza dove è installato in poche ore; per il montaggio è sufficiente predisporre il collegamento idraulico ed elettrico.

Figura 2.4.6.2 *A sinistra, esempio di deposito del cippato realizzato in tavole di legno inclinate. A destra, modulo mobile pre-assemblato installato in Mugello-Firenze (www.ecoenergie.it)*

Estrattori meccanici

Il cippato è estratto e condotto alla caldaia dal deposito o silo tramite dei sistemi meccanici. La tabella 2.4.6.1 presenta le principali caratteristiche dei sistemi d'estrazione più impiegati nei piccoli e medi impianti.

Tabella 2.4.6.1 *Principali caratteristiche dei sistemi di estrazione dei piccoli e medi impianti* [1, 7]

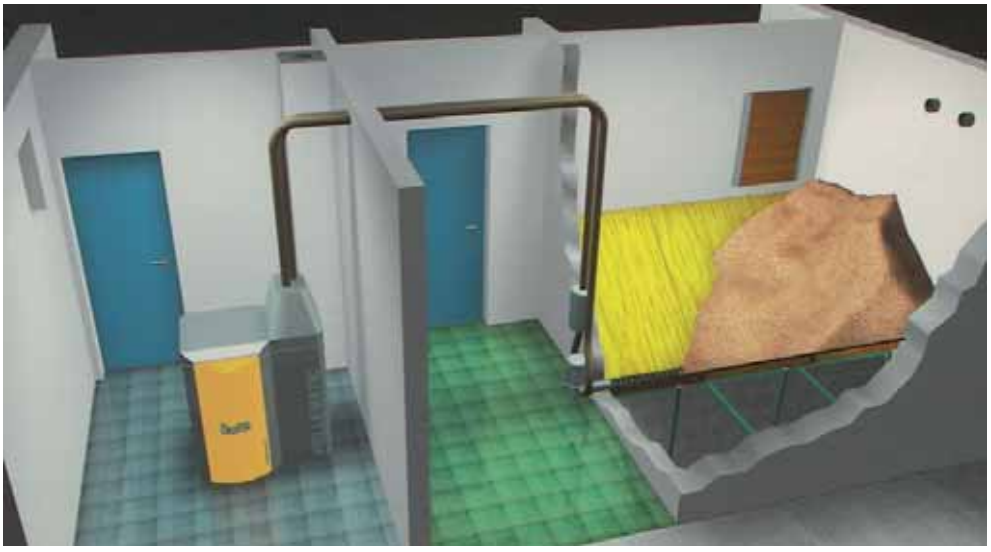
Sistema di estrazione	Base del silo	Misura del silo	Tipo di combustibile stoccato	Massima altezza del silo (m)	Capacità di estrazione (msr/h)
Silo a fondo inclinato/ tramoggia	circolare, angolare	Ø fino a ca. 4 m	pellet	> 20	
Estrattore con molle a balestra e braccio articolato	circolare, angolare	Ø 1,5 fino a 6 m	cippato P16-P45 (buona fluidità)	6	3
Estrattore conico	circolare (angolare)	diametro di oscillazione 1,5 fino a 5 m	cippato secco, fino a P45	10	5
Estrattore a coclea rotativa	circolare (angolare)	Ø 45 fino a 10 m	cippato P16-P100, segatura, trucioli	20	50
Estrattore a rastrelli	rettangolare	nessun limite (binari paralleli)	cippato P16-P100, triturato	10	20

Estrazione dal silo con fondo inclinato (pellet)

Rispetto al cippato il pellet presenta una fluidità e capacità di scorrimento maggiore perciò la sua movimentazione è meno problematica e onerosa. Per movimentare i pellet è sufficiente un piano inclinato (35-45°) o una tramoggia lungo le cui pareti scivolano giù verso la coclea d'estrazione o verso il sistema di trasporto pneumatico che li conduce in un serbatoio di stoccaggio settimanale (intermedio) adiacente alla caldaia.

Nel caso del trasporto pneumatico, al posto della coclea sono presenti uno o più sonde d'aspirazione collegate al sistema pneumatico, oppure vi è una coclea d'estrazione che conduce ad un'unica sonda d'aspirazione (figura 2.4.6.3). Il sistema pneumatico si attiva automaticamente (o manualmente) non appena si raggiunge il livello minimo di carico del serbatoio intermedio. A volte il serbatoio intermedio può non essere previsto, perciò la coclea d'estrazione è collegata direttamente a quella d'alimentazione mediante un pozzetto di carico.

Figura 2.4.6.3 *Sistema di estrazione del pellet con silo a fondo inclinato e sistema pneumatico di alimentazione del serbatoio settimanale posto a fianco della caldaia (www.oekofen.it)*



Estrattore con molle a balestra o braccio articolato

È impiegato tipicamente nei silo dei piccoli impianti a cippato nei quali si tende a realizzare una sezione di prelievo più ampia possibile per evitare la formazione di "ponti". L'estrattore è composto da un paio di molle a balestra o braccia articolate che si distendono radialmente durante il lavoro d'agitazione dell'estrattore, riempiendo di cippato la fossa in cui lavora la coclea d'estrazione sotto il piano di rotazione degli estrattori. Il piano dell'estrattore può essere inclinato oppure piano; in quest'ultimo caso deve essere aggiunta un'ulteriore coclea di estrazione inclinata verso il pozzetto di carico all'interno del vano tecnico (figura 2.4.6.4).

Figura 2.4.6.4 *Estrattore a balestra (sinistra) e a braccio articolato (destra).*

Estrattore a coclea rotativa e conico

L'estrattore a coclea rotativa attua accanto al lavoro d'agitazione anche un'azione di trasporto radiale del cippato (sia umido che secco) verso il punto di prelievo centrale. L'estrattore conico lavora invece in posizione più inclinata e compie un lavoro di agitazione che favorisce l'autoscivolamento del cippato (secco) verso il sottostante pozzo di carico. Nel caso il silo non sia a pianta circolare ma angolare, l'estrattore non è mai in grado di svuotarlo completamente. La filettatura delle coclee in questo caso è generalmente dotata di alette di trascinamento che aumentano l'efficacia di estrazione del cippato dal silo.

Estrattore a rastrelli

L'estrazione a rastrelli consente di agire sul totale volume del deposito, che ha sempre base rettangolare. L'estrattore è composto da uno o più binari, installati ad una certa distanza l'uno dall'altro, lungo i quali scorrono avanti e indietro in senso orizzontale dei rastrelli azionati da pistoni oleodinamici posizionati esternamente al deposito del cippato. I rastrelli sono cuneiformi e spingono il cippato con la faccia anteriore fino a riversarlo dentro una cunetta posizionata lungo il lato corto del silo all'interno della quale è trasportato al focolare per mezzo di una coclea o di un trasportatore a catena. Gli estrattori a rastrelli garantiscono un'elevata sicurezza di funzionamento anche con cippato molto eterogeneo e pertanto sono impiegati tipicamente negli impianti di taglia medio-grande. Nei piccoli impianti il sistema a rastrelli è impiegato talvolta nei depositi prefabbricati oppure nei container preallestiti.

Sistemi d'alimentazione

Nei piccoli impianti s'impiegano generalmente sistemi d'alimentazione meccanici a coclea, sia per l'estrazione dal silo che per l'alimentazione del focolare. La capacità di alimentazione è tra l'altro dipendente dall'inclinazione del percorso di alimentazione la quale determina il livello di riempimento tra i passi delle coclee. I materiali fini (pellet) tendono a slittare indietro lungo i percorsi inclinati, riducendo la capacità di trasporto dell'alimentatore.

Nei grandi impianti e nel caso di materiali problematici (cippato grossolano) si può ricorrere anche a sistemi alternativi come ad esempio: trasportatori a palette raschianti, alimentatori vibranti, alimentatori a nastro. Il pellet è spesso trasportato per via pneumatica.

2.4.7 Fornitura, stoccaggio e logistica del cippato

È molto importante prima di progettare il silo del cippato incontrare i possibili fornitori e verificare i tipi di mezzi di trasporto di cui essi dispongono (volume del carico, tipo di scarico). Un colloquio preliminare con i fornitori aiuta a migliorare la configurazione del deposito e ad agevolare le operazioni di scarico. In presenza di un fornitore professionale (piattaforma biomasse) è raccomandabile stipulare un contratto di fornitura pluriannuale fissando le caratteristiche qualitative, le modalità di consegna e di calcolo del prezzo [8].

L'ottimizzazione dei costi di fornitura del cippato dipende oltre che dal volume del silo anche dalla logistica del trasporto e dello scarico. Il silo deve essere progettato in modo da essere facilmente accessibile dal mezzo di trasporto e deve essere provvisto di una o due aperture che consentano di riempirlo quanto più possibile.

Spesso non è conveniente prevedere un silo che contiene l'intero fabbisogno annuale. Ad esempio nel caso di un impianto da 30 kW sarebbe necessario un silo di ca. 60 m^3 per coprire l'intero fabbisogno annuale. Indicativamente pertanto il silo deve essere dimensionato in modo che, dopo ca. 15 giorni di funzionamento, si formi nel silo un volume vuoto tale da poter essere riempito con un nuovo carico di cippato. Quindi il calcolo va fatto sulla base del volume del mezzo di trasporto con cui sarà consegnato il cippato.

I carri agricoli ribaltabili hanno una capacità da 10 fino a 30 m^3, mentre i container da 25 a 70 m^3, fino ai cassoni con piano mobile che arrivano fino a 90 m^3.

Recentemente sono disponibili anche cassoni con dispositivi pneumatici di scarico del cippato, la cui capacità di trasporto varia da 30 fino a 60 m^3. Questi sistemi consentono di trovare soluzioni molto flessibili ed economiche potendo conferire il cippato come il pellet. Il camion-pompa è in grado di scaricare 60 msr in 1-1,5 ore a seconda della lunghezza della tubazione. La tubazione può essere disposta fino a 20-30 m in piano e fino a ca. 15-20 m in verticale (www.juma.bz).

In ambito rurale, nel caso di piccoli impianti, sono disponibili sul mercato anche piccoli sistemi pneumatici applicabili alla presa di forza del trattore (50 kW, www.mus-max.at).

Un'altra possibilità è quella di stoccare il materiale tal quale (stanghe) in prossimità del silo e di cippare direttamente dentro il deposito (www.deluca-woodenergy.it).

2.4.8 Fornitura, stoccaggio e logistica del pellet

Per garantire un elevato livello di comfort, le caldaie a pellet sono collegate ad uno stoccaggio annuale del combustibile che consente di rifornire automaticamente un serbatoio settimanale intermedio posto lateralmente alla caldaia. Diversamente dal cippato, si possono trovare molteplici soluzioni di trasporto dal silo al focolare, essendo il pellet trasportabile con coclee flessibili oppure con sistemi di trasporto pneumatico. Nelle zone di maggiore diffusione delle caldaie il pellet è consegnato con un'autobotte che riempie il silo per mezzo di un sistema pneumatico. Per garantire una corretta e idonea operazione di scarico è molto importante l'utilizzo di pellet di qualità certificata/attestata (www.pelletgold.net). Ai fini del corretto trasporto e stoccaggio, un utile riferimento normativo è rappresentato dalla ÖNORM M7136 *(Garanzie di qualità del trasporto e della logistica di stoccaggio del pellet di legno)*. Il conferimento di pellet con autobotti a scarico pneumatico attraverso tubazioni flessibili consente di realizzare il silo in luoghi di difficile accesso e rende possibile anche un miglior sfruttamento della capienza del deposito. La lunghezza delle tubazioni, dalla connessione con la casa fino ai bocchettoni di riempimento, non dovrebbe superare i 30 m. La via d'accesso dell'autobotte deve essere idonea alle sue tipiche dimensioni: lunghezza 10 m, larghezza 2,6 m e altezza 3,4 m e al suo peso: 10-18 tonnellate.

Prima dello scarico il conducente tara la pesa digitale integrata che restituisce il valore della quantità di pellet scaricata in continuo dal mezzo. Parallelamente al pompaggio del pellet nel silo, la polvere è aspirata e raccolta in un filtro a sacco, in questo modo la leggera depressione che si forma impedisce alla polvere di propagarsi nel vano tecnico durante la fase di pompaggio del pellet. Alla fine del servizio è stampata la bolla che riporta la quantità di pellet consegnata.

Per permettere l'estrazione automatica del pellet dal silo esso è configurato in modo che il pellet confluisca in un punto più profondo rispetto ai bocchettoni, così che può essere prelevato attraverso una coclea o un sistema di aspirazione.

I depositi possono essere di tre tipi:

- piccoli silo con pareti di legno, metallo o tessuto
- depositi con fondo a pareti inclinate
- cisterne sotterranee.

Piccoli silo

Rispetto al cippato non si utilizzano in genere organi meccanici, piuttosto si sfrutta l'omogeneità del pellet facendolo

scivolare lungo pareti inclinate verso la coclea di estrazione oppure verso il punto di aspirazione del sistema di trasporto pneumatico. Una soluzione conveniente è rappresentata dal "silo a sacco" ovvero un silo in tessuto sintetico a sezione quadrata montato su un telaio metallico. Le misure della base del silo arrivano fino a 2,2x2,5 m e l'altezza fino a 5 m.
Fra i vantaggi di questi silo vi è anche il fatto che le pareti, essendo traspiranti, fanno da filtro nei confronti della polvere che si forma durante il pompaggio del pellet, perciò non è necessario montare il sistema filtro ad aspirazione (secondo bocchettone).

Depositi con fondo a pareti inclinate

I requisiti tecnico-contruttivi di questi depositi sono definiti nella ÖNORM M7137.
Si tratta per lo più di depositi ricavati da spazi esistenti prossimi al vano tecnico della caldaia. Impiegando il sistema pneumatico si riesce a raggiungere un'altezza di carico del silo molto elevata. Per il dimensionamento del deposito, può essere applicato un valore di moltiplicazione del fabbisogno annuo di pellet in m^3 di 1,2 fino a 1,5. Perciò una casa unifamiliare, con una superficie di ca. 150 m^2, richiede un silo con una capacità di ca. 6 m^3. Indicativamente si può considerare che per ogni kW di potenza della caldaia sono necessari 0,9 m^3 di volume del silo, spazi vuoti inclusi.

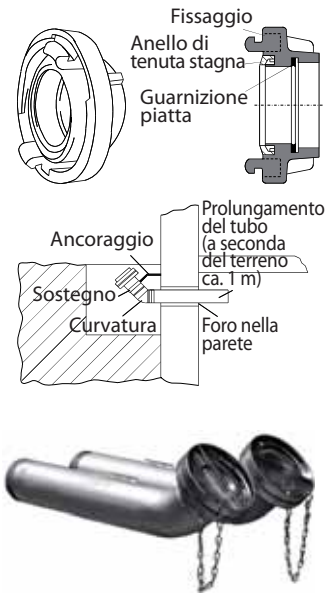
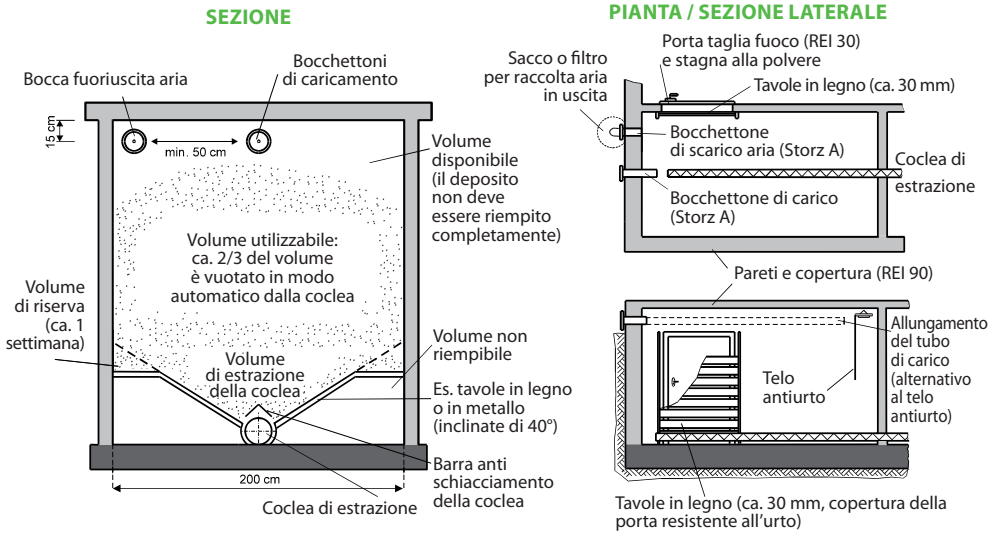


Figura 2.4.8.2 *Elementi del bocchettone ed esempio di montaggio* [1]

Muri e pavimentazioni devono essere dimensionati in modo tale da reggere il carico del pellet, ricordando che un metro stero riversato di pellet pesa ca. 620-650 kg. I muri e il solaio, oltre ad essere ignifughi e conformi alle norme per la sicurezza antincendio, devono essere assolutamente ermetici per evitare la fuoriuscita di polvere nella fase di caricamento pneumatico. In prossimità dei bocchettoni deve essere disponibile una presa elettrica per collegare l'aspiratore delle polveri. I depositi a base rettangolare sono i più indicati, in tal caso i bocchettoni sono montati su uno dei due lati corti del deposito per garantire un completo e omogeneo riempimento del silo, mantenendoli ad una distanza di almeno 50 cm. Nel caso in cui si debba caricare il silo per forza dal lato lungo, i bocchettoni devono essere più distanziati (ca. 1/3 dell'ampiezza del lato), così che possono essere impiegati in modo alternato con funzione di riempimento/aspirazione. I bocchettoni di carico devono essere ben accessibili dall'esterno (figura 2.4.8.2).

Per il sistema di collegamento (connettore del tubo flessibile) è presa come riferimento (anche in Italia) la DIN A 14309 *(misura Storz A)* imposta in Germania per ragioni di sicurezza antincendio. I bocchettoni devono essere collegati ad un dispersore di massa a terra. Per motivi di sicurezza antincendio nel silo non devono esserci installazioni elettriche, a meno che non si tratti di sistemi di protezione contro l'effetto esplosione [1]. La figura 2.4.8.3 illustra un esempio di progettazione di un silo per il pellet.

Figura 2.4.8.3 *Esempio di progettazione di un deposito per il pellet con fondo a pareti inclinate (www.oekofen.it)*


SEZIONE
Bocca fuoriuscita aria
Bocchettoni di caricamento
15 cm
min. 50 cm
Volume disponibile (il deposito non deve essere riempito completamente)
Volume utilizzabile: ca. 2/3 del volume è vuotato in modo automatico dalla coclea
Volume di riserva (ca. 1 settimana)
Volume non riempibile
Volume di estrazione della coclea
Es. tavole in legno o in metallo (inclinate di 40°)
Barra anti schiacciamento della coclea
200 cm
Coclea di estrazione
PIANTA / SEZIONE LATERALE
Sacco o filtro per raccolta aria in uscita
Porta taglia fuoco (REI 30) e stagna alla polvere
Tavole in legno (ca. 30 mm)
Bocchettone di scarico aria (Storz A)
Coclea di estrazione
Bocchettone di carico (Storz A)
Pareti e copertura (REI 90)
Allungamento del tubo di carico (alternativo al telo antiurto)
Telo antiurto
Tavole in legno (ca. 30 mm, copertura della porta resistente all'urto)

Serbatoi sotterranei

Il pellet può essere immagazzinato anche in serbatoi sotterranei di forma cilindrica o sferica, fatti in cemento armato, vetroresina o particolari materiali plastici.

Il limite superiore del deposito è posto ad una profondità di ca. 0,8 m rispetto al livello del terreno e collegato al soprassuolo attraverso un pozzetto di ispezione da dove avviene il caricamento pneumatico. L'estrazione del pellet avviene anch'essa per via pneumatica, ma in questo caso le tubazioni rimangono sotto il livello del terreno. Il flusso d'aria di trasporto è immesso attraverso una conduttura fino alla presa di prelievo posta sul corpo del serbatoio e da lì attraverso una conduttura parallela di ritorno pompato fino alla caldaia.

www.pelletstank.com

2.4.9 Sistemi di sicurezza

I sistemi di alimentazione delle caldaie automatiche devono essere dotati di specifici dispositivi di sicurezza contro il ritorno di fiamma. Le sicurezze sono solitamente localizzate in corrispondenza del pozzetto di carico tra la coclea di estrazione e quella di alimentazione del focolare. Il solo pozzetto di carico non è sufficiente ad assicurare che la fiamma non acceda al silo del cippato passando attraverso le due coclee comunicanti.
In questa zona è da prevedere pertanto la presenza di un **estintore di sicurezza** (ad acqua) che in caso di ritorno di fiamma inonda la coclea di alimentazione (figura 2.4.9.1 A). Questo avviene con il superamento di una temperatura critica, rilevata da un sensore posto sulla coclea collegato ad un regolatore termomeccanico che apre la valvola dell'estintore, costituito solitamente da un contenitore d'acqua d'idonea capienza a seconda della dimensione della caldaia. Poiché si tratta di un comando di "interruzione di flusso" la sua apertura è sempre garantita anche in caso d'avaria. Lo svantaggio di questo sistema è che nel caso in cui la valvola perda acqua, evento purtroppo non raro in dispositivi mal funzionanti, bagna il combustibile presente sulla coclea d'alimentazione. Inoltre esiste anche il rischio che la sonda di temperatura non rilevi il superamento del valore soglia e quindi l'estintore non venga azionato.

Per tali motivi questo sistema di sicurezza ad acqua è quasi sempre combinato con altri sistemi, quali ad esempio una **serranda ribaltabile o a saracinesca** (figura 2.4.9.1 B). La serranda tagliafuoco può tuttavia essere applicata anche come unico sistema di sicurezza; anche in questo caso il dispositivo di bloccaggio (a riarmo manuale senza collegamento elettrico) è attivato da un regolatore termomeccanico. La serranda può tuttavia essere ostacolata a causa della costipazione di materiale (fine).

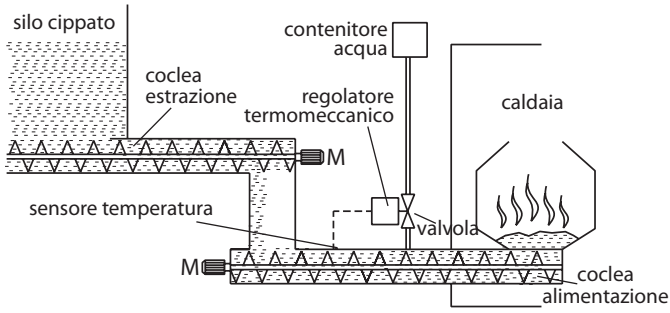
Una maggiore sicurezza è offerta dalla chiusura con **valvola stellare** posta tra le due coclee che mantiene chiusa la via del fuoco verso la coclea di estrazione (figura 2.4.9.1 C). Si tratta di una valvola in acciaio che gira in una scatola di ghisa azionata da un motore elettrico. Il vantaggio di questa (relativamente costosa) variante è la predisposizione contro i corpi estranei (ad es. di metallo). La valvola stellare è utile anche nel caso di cippato irregolare con pezzi fuori misura che sono tagliati dagli orli affilati della valvola. La chiusura a valvola stellare è spesso combinata con un sistema di spegnimento ad acqua.

Una variante della chiusura a valvola stellare è la **valvola a chiusura monocamera** in cui il dispositivo meccanico è dotato di un potente coltello e contro-coltello che consente di tagliare i pezzi fuori misura con notevole efficacia e minimo sforzo, mantenendo quindi una bassa richiesta d'energia elettrica del motore d'azionamento (figura 2.4.9.1 D).

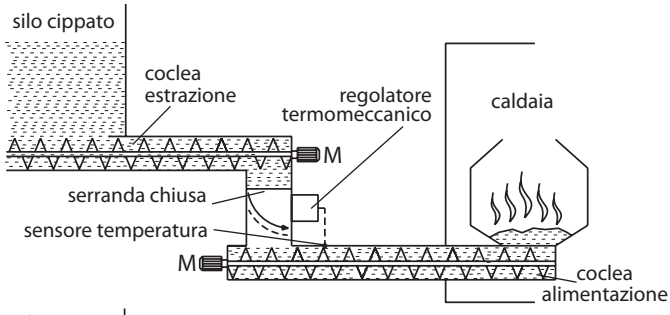
Come le caldaie a legna anche quelle a cippato sono dotate di dispositivi di sicurezza che impediscono la fuoriuscita dei gas esausti nel vano tecnico, mantenendo il focolare costantemente in depressione in caso di apertura della porta. Inoltre, anche in questo caso è disponibile una valvola di scarico termico, azionata in caso di surriscaldamento (§ 2.2).

Figura 2.4.9.1 *Dispositivi di sicurezza contro il ritorno di fiamma delle caldaie automatiche* [1, modificato]

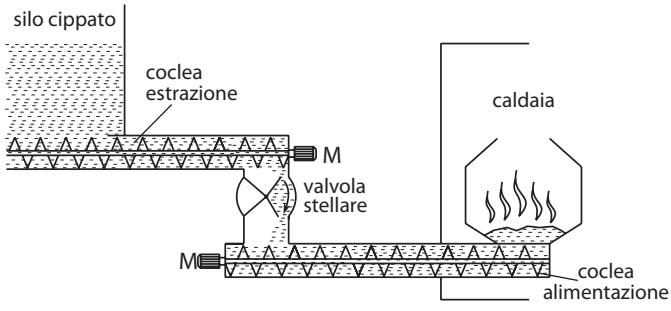
A. ESTINTORE DI SICUREZZA



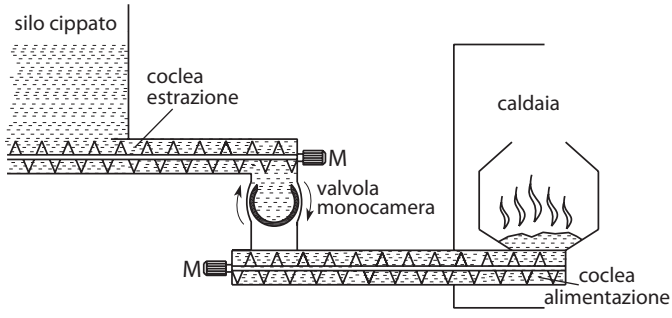
B. SERRANDA RIBALTABILE O SARACINESCA



C. VALVOLA STELLARE



D. VALVOLA A CHIUSURA MONOCAMERA



2.4.10 Sistemi di regolazione

Le caldaie automatiche sono in genere in grado di lavorare a potenza parziale, essendo dotate di specifici sistemi di regolazione. La combustione è spesso ottimizzata sulla base dei parametri che caratterizzano la condizione dei gas di scarico.

Regolazione di potenza

Consente alla caldaia di lavorare in automatico nell'ambito di più livelli di potenza fissati preliminarmente oppure in un campo di variazione continua della potenza.

Questa regolazione, in base alla momentanea potenza della caldaia, agisce sia sulla fornitura di combustibile che d'aria comburente, in misura di una percentuale della potenza nominale oppure talvolta la variazione avviene in continuo. Come misura della regolazione è impiegata principalmente la differenza tra valore reale e valore teorico della temperatura della caldaia. La maggior parte delle caldaie di grossa taglia dispongono oggi di sistemi di regolazione della potenza che consentono di passare in continuo dalla piena potenza (100%) a quella parziale (50%). Le caldaie di piccola taglia, che sono costruite in genere per essere alimentate con combustibili di contenuto idrico basso, riescono a modulare in un range di potenza persino ancor maggiore (100-30%). Questa capacità di regolazione migliora il rendimento annuo dell'impianto poiché le perdite di calore utile sono ridotte grazie ad un aumento dei tempi di lavoro della caldaia.

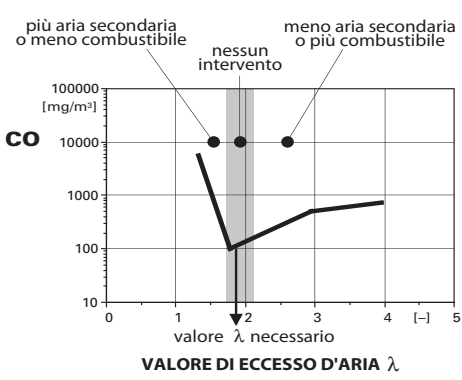
Sotto la potenza minima, che può essere raggiunta nelle caldaie con regolazione continua, l'impianto passa in modalità "accensione-spegnimento". Per un funzionamento completamente automatico la caldaia deve essere perciò in grado di spegnersi e accendersi all'occorrenza. Questo è ottenuto applicando un **dispositivo di accensione automatica** oppure attraverso la fase di mantenimento del letto di braci, alimentando periodicamente quanto basta il braciere. Il lavoro in modalità "accensione-spegnimento" in genere aumenta le emissioni rispetto al lavoro in continuo, mentre la fase di mantenimento delle braci aumenta le perdite causate dalle fasi di stallo *(stand-by)* della caldaia.

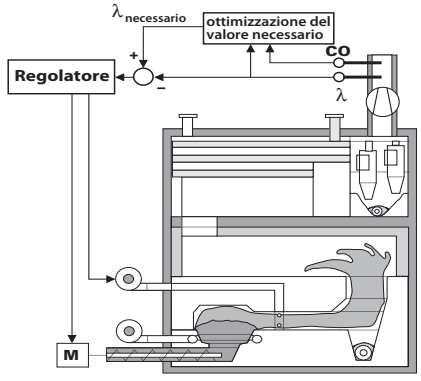
Regolazione della combustione

La regolazione della combustione rappresenta una funzione di regolazione aggiuntiva rispetto alla regolazione di potenza. Essa assicura un'elevata qualità di combustione nella fase di spegnimento e un elevato rendimento, **ottimizzando il rapporto combustibile/aria comburente**. Le caratteristiche del combustibile (es. massa volumica, umidità, tipo di legno) possono cambiare nel corso della combustione, specie impiegando il cippato, perciò i moderni impianti automatici sono equipaggiati con un sistema di regolazione che controlla in continuo la condizione della combustione, regolandola in modo ottimale. Nelle caldaie a cippato il sistema di regolazione più frequente è il sistema Lambda. In questo caso la misura dell'eccesso d'aria è raggiunta per mezzo di una sonda Lambda a contatto dei gas di scarico. L'eccesso d'aria è regolato attraver-

so la quantità di combustibile, di aria comburente o di aria secondaria, per cui il valore teorico dell'eccesso d'aria è stabilito in funzione della potenza ed eventualmente delle caratteristiche del combustibile. Per evitare situazioni di scarsità d'aria è raccomandabile impostare un valore teorico prudenziale (più alto), perciò una certa perdita di rendimento va messa in conto. Oltre alla sonda Lambda può essere impiegato anche un sensore di CO (figura 2.4.10.1) ottenendo così un'ottimizzazione supplementare del valore Lambda in funzione del tipo di combustibile.

Figura 2.4.10.1 *Principio di funzionamento della regolazione di combustione sulla base del rapporto CO/Lambda* [6]





Combinazione delle regolazioni di potenza e combustione

Per garantire una sicura ed idonea funzionalità della caldaia, la regolazione di potenza e quella di combustione devono essere ben coordinate. Il funzionamento dei due sistemi avviene a cascata: la regolazione di potenza è prevalente e poi il circuito agisce rapidamente sulla regolazione della combustione (figura 2.4.10.2).

La regolazione della potenza fornisce aria o quantità di combustibile e trasmette un valore teorico alla subordinata regolazione di combustione che va a regolare in modo raffinato la quantità di combustibile o la quantità di aria comburente.

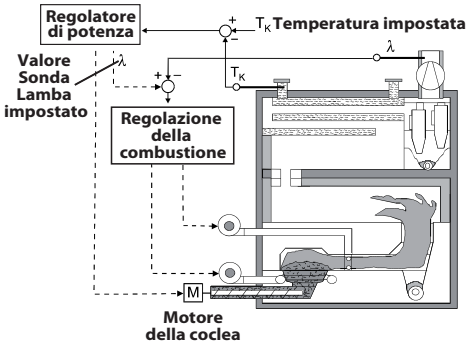


Figura 2.4.10.2 *Combinazione tra regolazione di potenza e di combustione in una caldaia a cippato* [1]

Negli impianti a griglia, quale complemento alle regolazioni citate della potenza e della combustione, è impiegata la regolazione dello spessore del combustibile per mezzo di sensori ottici che misurano lo profondità della brace lungo le diverse parti della griglia. Con la regolazione dell'alimentazione e il movimento di alcuni elementi della griglia, lo spessore del combustibile è mantenuto costante. Ciò permette una ripartizione più regolare dell'aria primaria ed una migliore separazione dei processi di emissione dei gas e di ossidazione [6].

3. MINIRETI DI TELERISCALDAMENTO

Il calore prodotto dalla caldaia può essere trasportato ad altri edifici posti nelle vicinanze dell'impianto attraverso una minirete di teleriscaldamento. Generalmente si tratta di impianti di potenza termica compresa tra 50 e ca. 500 (1000) kW, nei quali – a differenza dei grandi teleriscaldamenti – la temperatura dell'acqua nella rete è inferiore ai 95°C.

3.1 Densità degli allacciamenti e dimensionamento

Una minirete dovrebbe essere progettata cercando, da un lato, di contenerne la lunghezza e, dall'altro, ricercando un'elevata densità di utenze collegate, con valori variabili da ca. 0,5 a 1 kW/m; in questo modo si creano delle buone condizioni di partenza per un servizio efficiente ed economico. L'allacciamento di case unifamiliari con un basso fabbisogno termico (5-8 kW) può risultare talvolta poco interessante. Situazioni in cui la lunghezza del tracciato è compresa tra 4 e 6 metri per kW di potenza allacciata (0,25-0,16 kW/m) sono da considerare densità troppo basse che comportano un forte aumento delle perdite di rete.
Il dimensionamento della rete deve assicurare il fabbisogno richiesto dalle utenze, evitando il sovradimensionamento che causa elevate perdite e sconvenienza economica. Nel caso di reti con più di 10 utenze, deve essere considerato anche il fattore di contemporaneità d'utilizzo che, in funzione del tipo di utenze, varia da 1 a 0,6 (fattore di riduzione della potenza nominale).
Per il corretto dimensionamento della rete è essenziale il rilievo dettagliato del fabbisogno di riscaldamento e ACS degli utenti, incluse le perdite.
Al fine di minimizzare le perdite di rete la differenza di temperatura fra mandata e ritorno deve essere almeno di 30 °C, questo vale in particolare per i circuiti ad alta temperatura. Nei sistemi ben dimensionati con circuiti a bassa temperatura (per es. mandata 60 °C e ritorno sotto i 40 °C) la perdita media annua della rete è inferiore al 10%, mentre quando la rete è mal dimensionata si possono raggiungere perdite superiori al 20% [1].

3.2 Tubazioni

La rete di teleriscaldamento è composta da tubazioni ben isolate. I tubi – di acciaio o di plastica, sono isolati verso l'esterno con schiuma di polietilene (PE) o di poliuretano (PU). La schiuma

di PU ha una più bassa conduttività del calore, perciò le condutture sono più sottili rispetto a quelle in PE. Le minireti possono essere realizzate con tubazioni rigide in acciaio coperte da un mantello di plastica (nero) oppure con tubi flessibili in plastica. Nei grandi teleriscaldamenti sono installati tubi rigidi in acciaio che costituiscono un sistema di trasporto robusto, idoneo per temperature fino a 140°C e pressione di 25 bar, con diametri nominali (DN) da 20 a 1000 mm e lunghezza dei tubi singoli fino a 16 m, poi saldati tra loro. Per le curve e le diramazioni sono impiegate apposite forme, coibentate in seguito. Le forti dilatazioni termiche in lunghezza rendono necessario attuare dispendiose misure di compensazione.

Per la distribuzione secondaria e l'allacciamento ad utenti domestici sono impiegati i tubi flessibili. Le tubazioni flessibili sono posate come tubi continui srotolati da un tamburo (DN fino a 110). Essi sono leggeri e facili da piegare, consentendo di lavorare con ridotti raggi di curvatura e una posa molto flessibile della conduttura, benché le forme (T, riduzioni, diramazioni) risultino particolarmente costose. I tubi flessibili compensano da sé le dilatazioni termiche, perciò possono essere realizzati anche lunghi tracciati nel terreno (fino a 150 m) senza prevedere sistemi di compensazione.

I tubi flessibili in plastica possono essere impiegati nel range di potenza 10-700 kW con limiti massimi di temperatura e pressione rispettivamente di 95°C e 6 bar.

Nel caso d'impianti più piccoli, fino a DN 50, sono disponibili anche tubi integrati (duo-tubo) che includono mandata e ritorno (figura 3.2.1) o addirittura tubi integrati a fasci di quattro che includono mandata e ritorno del riscaldamento, condotta del sanitario e sua circolazione. Essi sono idonei nei luoghi particolarmente angusti. La tabella 3.2.1 riporta le tipiche caratteristiche dei tubi flessibili in plastica.

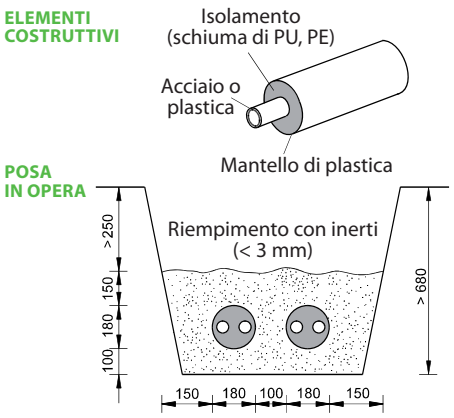
Tabella 3.2.1 *Sigle, caratteristiche e prezzi orientativi (2007) delle tubazioni flessibili* [1]

Dimensioni	Misure[a] (mm)	Potenza (kW)	Prezzo (€/m) tubo singolo	Prezzo (€/m) tubo doppio	Mantello esterno Ø (mm)	Perdita di calore[b] W/(h m)
DN 20	25/20,4	10-30	22	35	128	21
DN 25	32/26,0	20-60	26	41	128	26
DN 32	40/32,6	40-90	33	50	160	27
DN 40	50/40,8	40-140	41	67	160	28
DN 50	63/51,4	70-230	54	-	160	32
DN 65	75/61,2	100-330	64	-	200	34
DN 80	90/73,6	150-480	70	-	200	37
DN 90	110/90,0	< 700	78	-	200	41

a. Diametro esterno/interno

b. Perdita di calore per il tubo integrato doppio (andata e ritorno) in W/(h m) nelle seguenti condizioni: T acqua 90/70 °C, T terreno 5 °C, distanza tra i tubi 10 cm, profondità dello scavo 80 cm.

Figura 3.2.1 *In alto caratteristiche del mono-tubo; sezione della posa di due duo-tubi per il trasporto di calore, così come acqua sanitaria e acqua potabile (misure in mm)* [1]. *Nella foto esempio di posa di tubi flessibili continui.*



3.2.1 Posa in opera

Nelle minireti sono impiegate generalmente le reti dirette che non prevedono diramazioni della conduttura tra il produttore di calore e l'utente allacciato. Questa configurazione si ha nei casi di lunghezza del tracciato molto contenuta. Una rete ad anello è certamente più costosa, ma consente di collegare più generatori di calore in diversi punti della rete, oltre ad essere facilmente ampliabile ed offrire un'elevata sicurezza di fornitura. Nelle minireti si tratta spesso di un trasferimento del calore casa per casa, per cui risultano collegate tra loro un gruppo di utenze con un basso numero di biforcazioni e una bassa possibilità di ampliamento. Un'altra situazione si verifica quando sono collegati appartamenti direttamente attigui al generatore installato nel vano tecnico condominiale (centralizzato); in questo caso non ci sono scavi da fare e anche la manutenzione è notevolmente facilitata.
La profondità dello scavo varia da 60 a 80 cm e la tubazione è posata su un letto di sabbia sciolta (granulometria fino a 3 mm) per lo scarico delle pressioni e per assicurare il tubo contro le gelate. Per una garanzia assoluta contro il gelo lo scavo può essere più profondo da 80 a 120 cm. Ad una profondità di ca. 20-30 cm è posata una banda di segnalazione di emergenza del tracciato che segnala lo sviluppo della conduttura, in caso di riparazioni.

3.3 Fornitura di ACS nelle minireti

Generalmente, almeno nei tracciati più lunghi, il circuito primario che parte dalla caldaia centralizzata si interfaccia con le utenze per mezzo di una sottostazione che cede e contabilizza il calore al circuito dell'utenza sia per il riscaldamento che per l'acqua sanitaria (ACS).

Se la minirete è priva di sottostazioni, l'ACS è in ogni caso fornita dal generatore centralizzato, impiegando un sistema a scorrimento oppure un sistema ad accumulo.
Nei sistemi a scorrimento l'ACS è direttamente disponibile presso l'utilizzatore senza la presenza di un accumulo, quindi è necessaria una circolazione continua e perciò, rispetto ai sistemi ad accumulo, una tubazione più lunga (mandata e ritorno), con conseguenti maggiori perdite di rete. Con la presenza dell'accumulo, invece, l'ACS è prodotta riscaldando l'acqua fredda all'interno dell'accumulo presente presso l'utente. La rete serve quindi solo da fonte di calore che riscalda l'ACS ad intervalli predefiniti. Quindi la temperatura di circolazione della rete è portata di notte (ad es. per due ore) a 65°C per caricare l'accumulo giornaliero di ACS. Una temperatura superiore ai 60 °C non ha senso per l'aumento dell'effetto negativo del calcare (incrostazioni), tuttavia per ragioni igieniche può essere necessario (per prevenire il pericolo della legionella). Questo avviene ad esempio portando una volta a settimana la temperatura sopra i 60 °C [1].

4. INVESTIMENTI E COSTI DI GESTIONE

4.1 Investimento per tipo di impianto e classi di potenza

In tabella 4.1.1 si riportano per la realtà italiana, alcuni riferimenti di costo per gli impianti a legna, cippato e pellet; considerato che ogni caso presenta delle proprie e specifiche peculiarità e quindi il grado di variabilità è ampio, tali valori hanno carattere orientativo. Si forniscono inoltre alcune informazioni sui consumi medi annui nonché alcune indicazioni qualitative sull'approvvigionamento e la complessità gestionale.

Tabella 4.1.1 *Costi, consumi orientativi e indicazioni sulla filiera di approvvigionamento e la gestione*

Tecnologie e potenza	Livello investimenti (€)	Consumi indicativi t/a	Processi di approvvigionamento biomasse legnose	Complessità tecnologica e gestionale
Caldaia a legna				
fino a 35 kW	7.000-15.000	5-10	Semplice e locale	Molto bassa
35-100 kW	15-30.000	10-25		
Caldaia a cippato				
35-150 kW	20-70.000	10-35	Semplice e locale	Bassa
150-300 kW	70-150.000	50-100	Locale, necessaria presenza di produttori professionali	Media, necessaria presenza di terzo responsabile
300-500 kW	150-350.000	100-150		
500-1000 kW	350-500.000	150-300		
Caldaia a pellet				
fino a 35 kW	10.000-15.000	5-7	Canali commerciali facilmente accessibili	Molto bassa

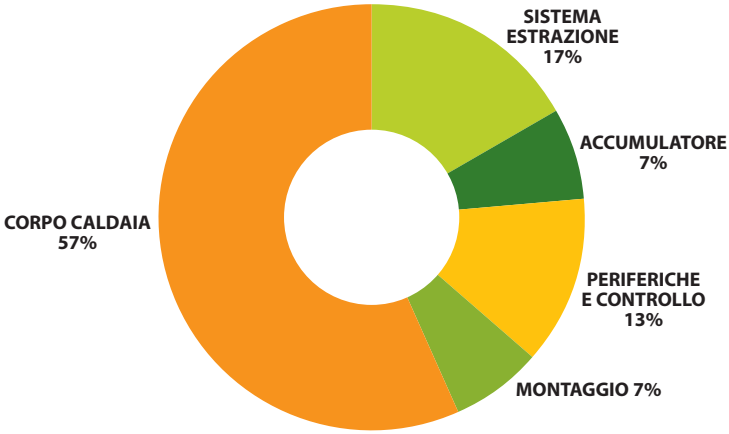
Da valutazioni fatte su 55 esempi di impianti a cippato realizzati negli ultimi anni in Germania rispetto ai costi di installazione di un caldaia a cippato di potenza compresa tra 25 e 100 kW i costi posso essere così ripartiti come descritto nella tabella 4.1.2.

Tabella 4.1.2 *Costo delle componenti di un impianto a cippato* [5]

	€/kW
Corpo caldaia	100-320
Tubazioni e allacciamenti	10-150
Sistema di estrazione (senza silo)	10-160
Montaggio	10-80

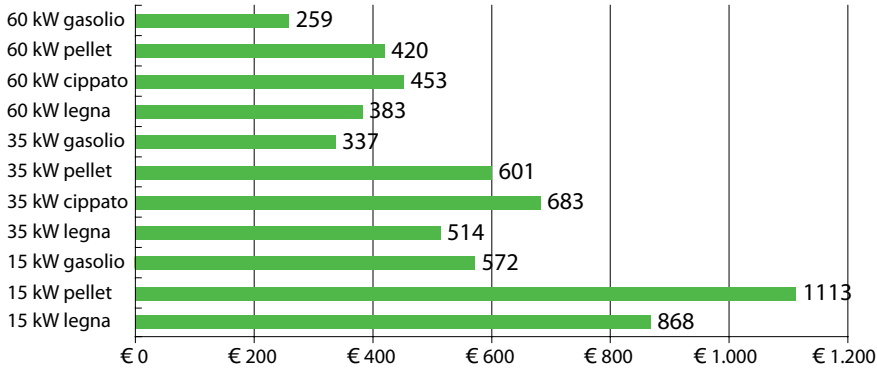
La struttura percentuale dei costi per una caldaia a cippato con potenza compresa tra 15 e 100 kW è riportata nel grafico 4.1.1.

Grafico 4.1.1 *Incidenza percentuale delle varie parti di un impianto sul costo complessivo* [5]



Il costo specifico (€/kW), escluse le opere edili per il silo, distinguendo tipo di impianto e classi di potenza, è riportato nel grafico 4.1.2.

Grafico 4.1.2 *Costi specifici (€/kW) per diverse tipologie d'impianto* [5]



Dal monitoraggio di alcuni bandi regionali che hanno finanziato (2000-2006) caldaie a legna, cippato e pellet, sono state estratte alcune informazioni tecnico-economiche di seguito riportate; l'investimento include anche le opere edili e la rete di teleriscaldamento (tabella 4.1.3 e grafici 4.1.3 e 4.1.4).

Tabella 4.1.3 *Principali caratteristiche tecnico-economiche degli impianti* [13]

Tipologia impianto	N°	Potenza installata			Investimento specifico medio (€/kW)
		massima	media	minima	
Legna da ardere	34	100	35	20	611
Cippato <100	10	100	50	25	1028
Cippato >100	8	700	400	110	403
Pellet	8	45	30	28	542
TOTALE	60				

Grafico 4.1.3 *Costi specifico medio (€/kW) degli impianti distinti per tipo e classe di potenza (tabella 4.2.3)*

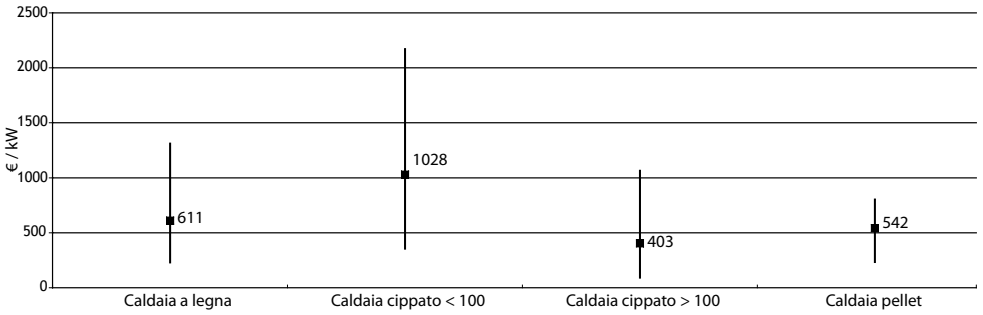


Grafico 4.1.4 *Costi specifici degli impianti alimentati a cippato di media taglia realizzati negli ultimi 3-5 anni in Toscana, in Veneto e Friuli Venezia Giulia (€/kW)*

LEGENDA es. 200 kW, 320 m: sono rispettivamente la potenza della caldaia e la lunghezza della rete di teleriscaldamento

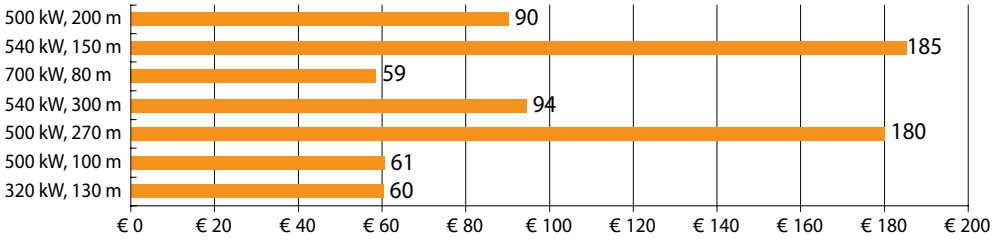
4.2 Costo della rete

Il costo della rete di teleriscaldamento può costituire una voce significativa sull'investimento complessivo, principalmente in funzione della distanza del tracciato, della onerosità delle operazioni di scavo e ripristino e del numero e tipo di utenze collegate.
Si possono fare utili valutazioni e comparazioni esprimendo il costo della rete secondo due indici tecnico-economici:

- costo della rete per unità di potenza (€/kW)
- costo della rete per unità di lunghezza (€/m).

I grafici 4.2.1 e 4.2.2 illustrano i risultati del monitoraggio degli investimenti fatti su impianti a cippato di media potenza operativi da qualche anno in Italia.

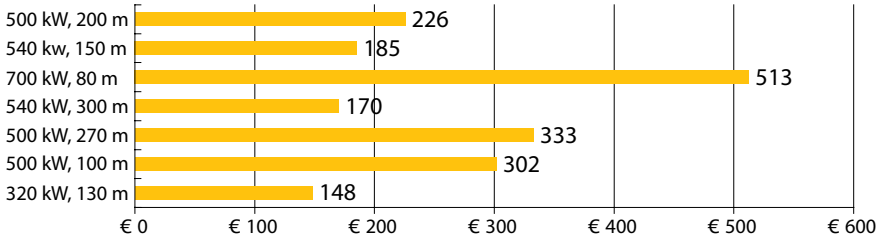
Grafico 4.2.1 *Costo della rete di teleriscaldamento in funzione della potenza (€/kW)*



LEGENDA 500 kW, 200 m: si tratta di un impianto a cippato di 500 kW di potenza nominale a cui è collegata una rete di teleriscaldamento di 200 metri complessivi.

In questo secondo grafico 4.2.2 si riporta per i medesimi impianti il costo della rete in relazione alla sua lunghezza.

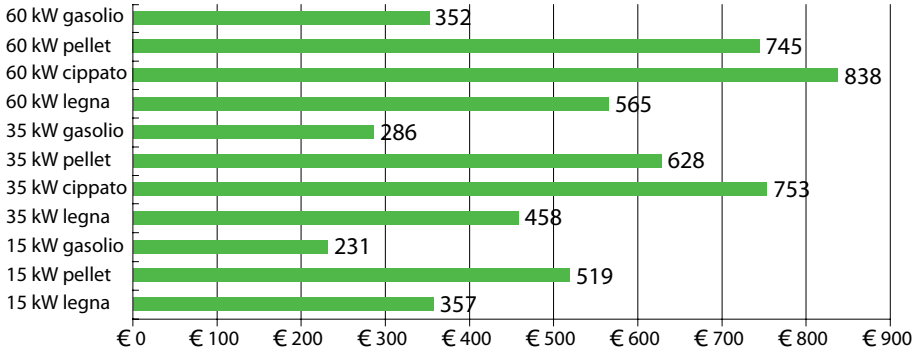
Grafico 4.2.2 *Costo della rete di teleriscaldamento in funzione della sua lunghezza (€/m)*



4.3 Costi di gestione e manutenzione

Per impianti medio-piccoli l'ordine di grandezza dei costi di gestione e manutenzione annui (pulizia, controllo e riparazioni) può essere ricavato dal grafico 4.3.1.

Grafico 4.3.1 *Costi di gestione e manutenzione (€/anno) per vari sistemi di riscaldamento* [5]

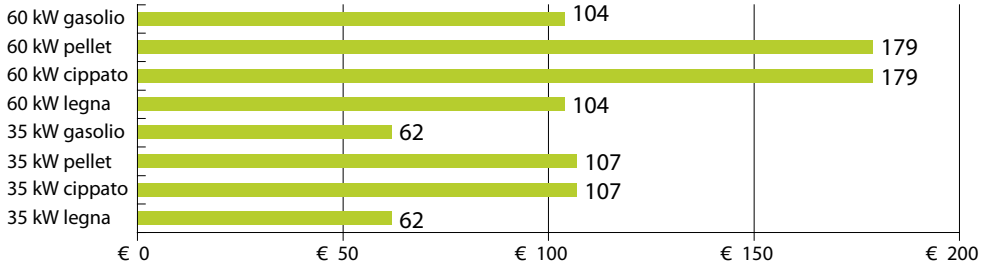

60 kW gasolio 352
60 kW pellet 745
60 kW cippato 838
60 kW legna 565
35 kW gasolio 286
35 kW pellet 628
35 kW cippato 753
35 kW legna 458
15 kW gasolio 231
15 kW pellet 519
15 kW legna 357
€ 0 € 100 € 200 € 300 € 400 € 500 € 600 € 700 € 800 € 900

I medesimi costi riferiti dai gestori per impianti di taglia media (200-600 kW), generalmente alimentati a cippato, variano tra 2.500 e 4.000 €/anno.

4.4 Spesa elettrica

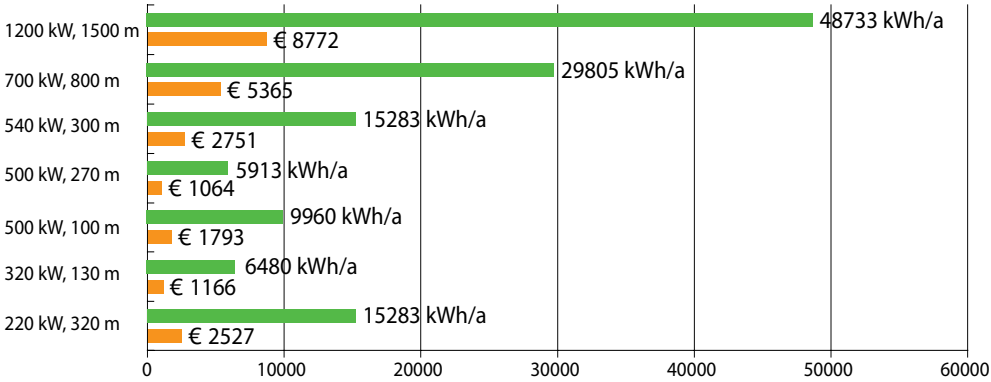
Il grafico 4.4.1 fornisce un ordine di grandezza della spesa di energia elettrica per il funzionamento degli apparecchi di piccola potenza.

Grafico 4.4.1 *Spesa per l'elettricità di diversi impianti* [5]


60 kW gasolio 104
60 kW pellet 179
60 kW cippato 179
60 kW legna 104
35 kW gasolio 62
35 kW pellet 107
35 kW cippato 107
35 kW legna 62
€ 0 € 50 € 100 € 150 € 200

Per caldaie ed impianti di teleriscaldamento di media taglia, il consumo di energia elettrica e la relativa spesa annua è quelle riportata nel grafico 4.4.2, che deriva da dati rilevati in impianti in funzione con contatore elettrico dedicato.

Grafico 4.4.2 *Consumo e spesa per l'elettricità di diversi impianti a cippato con differenti potenze e lunghezze di teleriscaldamento* [12]



LEGENDA 540 kW, 1500 m.: il primo valore esprime la potenza termica della caldaia a cippato e il secondo la lunghezza delle rete di teleriscaldamento.

In fase di progettazione è molto importante il corretto dimensionamento delle elettropompe e della rete di riscaldamento (§ 2.3) per non incorrere in costi eccessivi di energia elettrica che possono compromettere la sostenibilità finanziaria dell'impianto. In generale la spesa elettrica dovrebbe attestarsi attorno al 5-10% rispetto alle spese correnti annue [11].

4.5 Costi delle opere edili

Le opere edili per le caldaie a combustibili legnosi si riferiscono all'adeguamento e/o alla costruzione *ex-novo* del vano tecnico e del silo per il cippato o per il pellet.
A partire dalle rilevazioni fatte in alcuni impianti a cippato già realizzati e funzionanti, si riportano (tabella 4.5.1) alcuni valori di costo unitario (€/m^3) per la costruzione del deposito del cippato e in alcuni casi anche del vano tecnico della caldaia. In tutti i casi si tratta di depositi interrati o seminterrati realizzati in calcestruzzo armato; il costo comprende anche lo scavo di sbancamento e le opere di impermeabilizzazione.

Tabella 4.5.1 *Indicazioni di costo delle opere edili in alcuni impianti a cippato*

Potenza caldaia (kW)	Volume silo (m^3)	Volume vano tecnico (m^3)	Volume totale (m^3)	Costo unitario (€/m^3)
300	90	-	90	333,3
540	120	150	270	259,3
500	120	160	280	214,3
540	145	-	145	482,8
600	100	-	100	465,0

5. RENDIMENTI ED EMISSIONI

Ci sono molti parametri da prendere in considerazione per giudicare compiutamente la bontà di un generatore termico a biomasse legnose. Solo pochi di questi consentono tuttavia una oggettiva valutazione comparativa. Tra questi i più importanti sono il rendimento e il livello d'emissioni nocive, che sono rilevati con metodi di prova uniformi è codificati e valgono in senso lato come indicatori tecnico-ambientali dell'apparecchio.

5.1 Rendimenti

Si distinguono il rendimento al focolare dal rendimento della caldaia (§ 1.1). Negli apparecchi termici domestici è determinato solo il rendimento al focolare, poiché gran parte del calore utile è diffuso nell'ambiente da riscaldare e non indirettamente attraverso un vettore termico. Solo per le caldaie centralizzate è possibile determinare entrambi i rendimenti.

Struttura delle perdite di calore

La figura 5.1.1, che si riferisce ad un tipico schema di flusso del calore di una piccola caldaia a cippato, chiarisce la differenza tra i due rendimenti.

Il rendimento al focolare comprende: -le perdite di calore nei gas di scarico, -le perdite nei residui (combustibili) che rimangono nelle ceneri e -le perdite derivanti dalla combustione incompleta. Il rendimento della caldaia invece, include anche le perdite per radiazione della superficie della caldaia che, nei piccoli impianti, corrisponde mediamente al 3%.

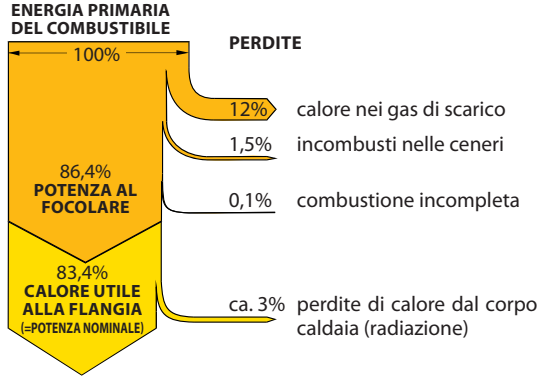
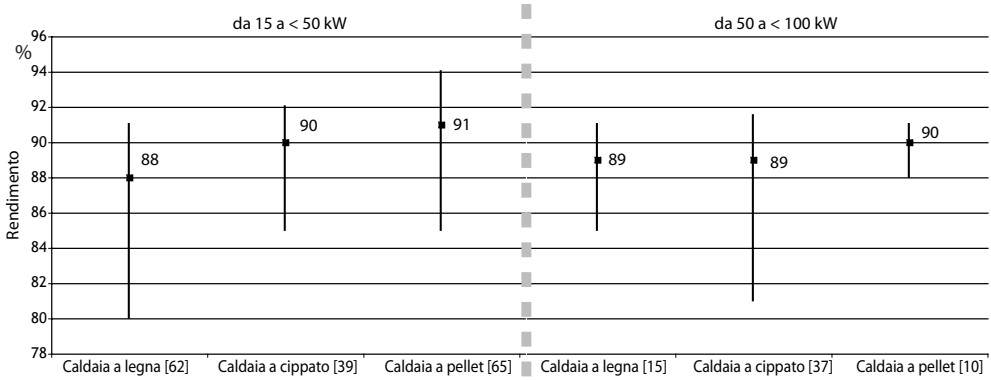


Figura 5.1.1 *Tipico diagramma di flusso del calore di una caldaia a cippato (50 kW) a potenza nominale* [1]

Come mostra il diagramma la maggior parte delle perdite di calore va nei gas di scarico, perciò le misure costruttive per aumentare il rendimento sono dirette per lo più a ridurre la temperatura dei fumi, mentre il miglioramento della combustione dei gas serve principalmente a ridurre il carico di sostanze nocive nei fumi esausti.
La temperatura dei gas di scarico non può però oltrepassare il punto di rugiada, al di sotto del quale si formerebbero i condensati nella canna fumaria, che creano danni lungo il suo tragitto e possono aumentare anche il pericolo d'incendio della stessa.

Rendimento delle caldaie centralizzate
Il rendimento della caldaia, rispetto a quello al focolare, è più basso di 2-4 punti percentuali (figura 5.1.2).

Figura 5.1.2 *Rendimento a potenza nominale delle caldaie a legna, cippato e pellet. Risultati di 10 anni di prove (1996-2006) presso il TFZ di Straubing (www.tfz.bayern.de)* [1]

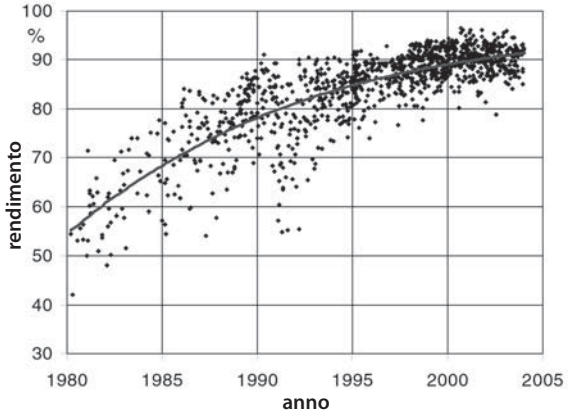


[ ] : numero di misurazioni

Le moderne caldaie raggiungono un rendimento superiore all'85% e nei modelli più recenti oltrepassano stabilmente il 90%. Questo vale in particolare per le caldaie a pellet che in genere raggiungono un rendimento di 2-3 punti percentuali superiore alle caldaie a legna e cippato. Le differenze tra modelli e classi di potenza sono comunque molto basse. Il rendimento è misurato solitamente quando la caldaia lavora a potenza nominale e in teoria quando lavora invece a potenza parziale dovrebbero aumentare le perdite di calore, che in realtà non si osservano. Molte volte, infatti, il calo di carico termico – con il conseguente abbassamento della temperatura dei fumi – comporta una diminuzione delle perdite di calore nei gas di scarico e di conseguenza un aumento del rendimento. Se tuttavia nei carichi termici più bassi la caldaia non è regolata bene e si manifesta un troppo elevato eccesso d'aria, anche il rendimento può calare.

Evoluzione del rendimento
Come si evince dai dati pubblicati dagli enti di certificazione preposti, negli ultimi 25 anni il rendimento delle caldaie è aumentato di ca. 30 punti percentuali (figura 5.1.3).

Figura 5.1.3 *Evoluzione del rendimento in caldaie manuali ed automatiche di piccola taglia. Risultati delle prove di certificazione del BLT di Wieselburg (blt.josephinum.at)*



Allo stato dell'arte, l'ulteriore aumento di rendimento è concepibile solo attraverso l'introduzione di scambiatori aggiuntivi con effetto di condensazione.

Nel settore delle biomasse la tecnica di condensazione è impiegata solamente nei grandi impianti; è da rilevare tuttavia che di recente sono stati sviluppati modelli anche per l'impiego in piccole caldaie. Dai risultati fin qui resi pubblici è stato dimostrato che, senza un aggiuntivo fabbisogno di combustibile, può essere raggiunto un aumento medio della potenza (e del rendimento) del 18%. Inoltre, attraverso la formazione dei condensati si ottiene anche un notevole effetto di lavaggio del particolato presente nei gas di scarico con una conseguente riduzione delle emissioni (§ 2.4.5).

La tecnica di condensazione è applicabile ai sistemi di riscaldamento a bassa temperatura (radianti). Per un'applicazione conveniente di tale tecnica sono particolarmente interessanti le nuove costruzioni riscaldate a pellet, nelle quali l'aumento di rendimento può consentire un ulteriore interessante risparmio di combustibile, il cui costo è relativamente elevato.

5.2 Emissioni

5.2.1 Composizione e impatto sulla salute

Le emissioni nocive degli apparecchi a biomasse legnose sono composte principalmente da quattro elementi:

- Monossido di carbonio (CO)
- Polveri totali
- Ossidi di azoto (NO_x)
- Composti organici volatili (COV, C_nH_m).

Monossido di carbonio (CO). È un gas inodore che appena emesso in atmosfera è facilmente ossidato in CO_2. Poiché il CO è facilmente misurabile è utilizzato per rilevare la bontà della combustione e rappresenta quindi il parametro di emissione più spesso misurato a valle dei processi di combustione.

Composti organici volatili (COV). Sono composti ad elevato peso molecolare spesso indicati semplicemente come idrocarburi carboniosi (C_nH_m). A differenza del CO formano un gruppo di sostanze con un impatto sulla salute umana e sull'ambiente notevolmente maggiore, poiché sono classificati in parte come sostanze cancerogene. I COV sono caratterizzati da un odore molto forte che arreca notevole disturbo. Come il CO essi sono il risultato della combustione incompleta.

Polveri totali consistono nella parte separata, con un apposito filtro, dai gas di scarico della combustione dei combustibili solidi. Esse contengono principalmente elementi minerali del combustibile (particelle di cenere). A seconda della bontà della combustione possono essere originati anche incombusti carboniosi organici e catrami. Inoltre, sulla superficie delle polveri possono essere adsorbiti gli altamente tossici composti policiclici aromatici e le diossine. Questo effetto si rileva in particolare nella componente più fine delle polveri dei gas di scarico (particolato), a causa della loro elevata superficie. Queste sostanze sono in parte raccolte nelle ceneri di risulta dalla pulizia dello scambiatore e del camino. Con il termine polveri sottili (PM) sono indicate tutte le particelle con un diametro aerodinamico (d_{ae}) inferiore ai 10 µm. Sotto 1 µm inizia il così detto campo dimensionale submicron. Per la salute umana sono significative soprattutto le particelle che riescono a penetrare nel sistema respiratorio (polmoni). Mentre le particelle con d_{ae}>10 µm sono trattenute quasi completamente nel naso e nella gola, nel campo inferiore ai 2,5 µm una gran parte delle particelle entra nei polmoni e sotto 1 µm entrano negli alveoli e si depositano nei tessuti polmonari. Tali particelle sono considerate particolarmente tossiche quando originate da processi di combustione perché sulle loro superfici adsorbono incombusti carboniosi o possono condurre metalli pesanti e così fungono da vettori di trasporto di sostanze nocive irritanti, tossiche, cancerogene o mutagene.

Ossidi di azoto. Inizialmente sono emessi in forma di NO e poi, in presenza di ossigeno, sono rapidamente ossidati in diossido di azoto (NO_2); entrambi i composti sono indicati come NO_x. Essi derivano sostanzialmente dall'azoto contenuto nel combustibile che nel legno assume

valori relativamente bassi (0,15%). La reazione dell'azoto con l'ossigeno avviene a temperature superiori a 1300 °C, che nel corso della combustione del legno si manifestano per lo più solo localmente e temporaneamente. L'NO_2 è un gas tossico con odore penetrante, percepito a partire da 1 ppm, da 25 ppm crea bruciori agli occhi e da 150 ppm può provocare danni all'apparato respiratorio. Gli ossidi di azoto partecipano anche alla formazione dell'ozono, che provoca bruciore agli occhi, mal di testa, disturbi respiratori, oltre a contribuire all'effetto serra.

Oltre ai quattro sopracitati e misurabili parametri standard delle emissioni, come per tutti i processi di combustione esistono poi ulteriori emissioni nocive.
Qui sono annoverati il gruppo degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), delle sostanze nocive a base di cloro (HCl, diossine e furani) e dei metalli pesanti emessi con i gas di scarico. Anche la suddivisione dimensionale delle ceneri volatili emesse in forma di polveri rappresenta un importante criterio di valutazione. Tuttavia questo sarà trattato solo marginalmente nei prossimi capitoli, tanto più che nei piccoli apparecchi questi non sono valori per i quali sono imposti limiti di legge, perciò in questo ambito esistono pochi dati. Lo stesso discorso vale per le emissioni di SO_2.

5.2.2 Fattori di conversione

Nei piccoli impianti a biomasse i valori di emissione fanno riferimento ad un contenuto di ossigeno (O_2) del 13%. Il confronto con impianti di maggiore taglia richiede una conversione perché si fa spesso riferimento ad un contenuto di ossigeno dell'11%. Il fattore di conversione è il seguente:

1 mg/Nm³ al 13% O_2 = 1,25 mg/Nm³ all'11%

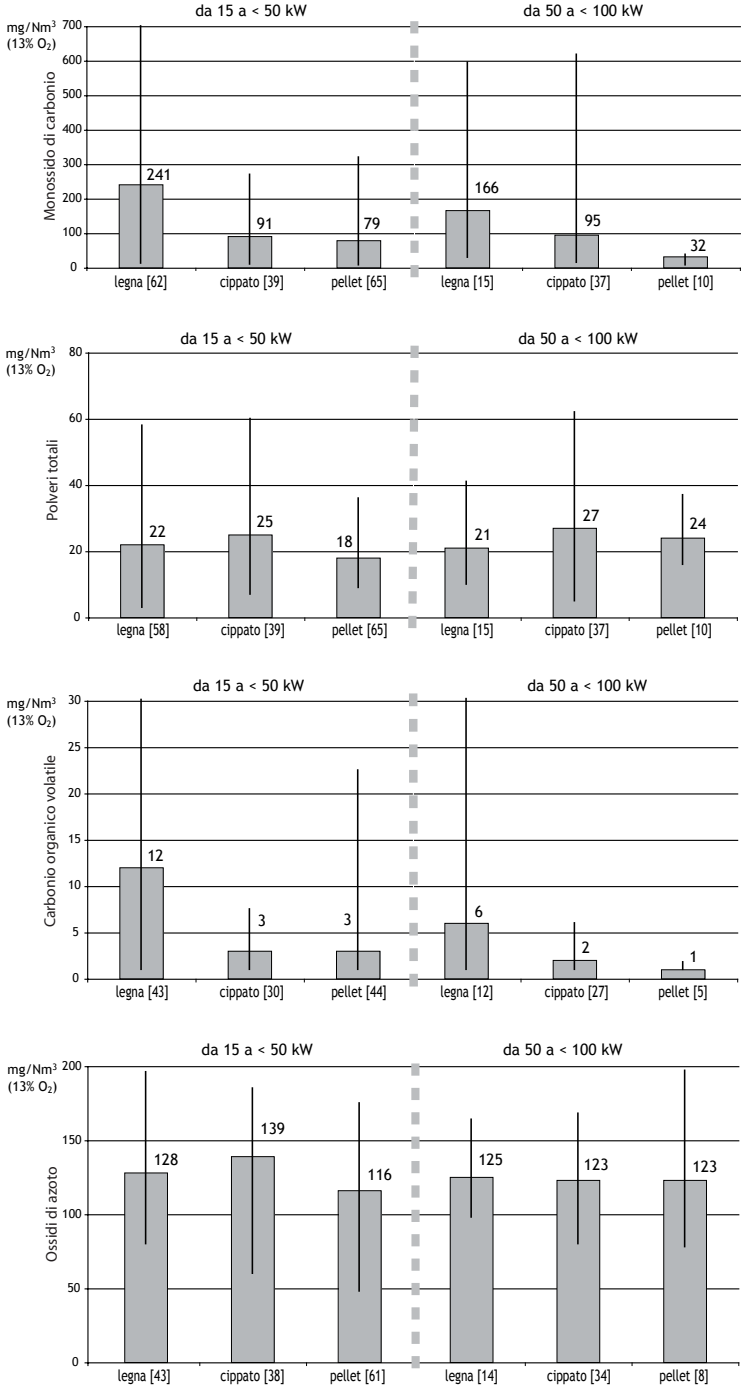
Frequentemente inoltre i fattori d'emissione sono riferiti non al Nm^3 ma piuttosto al contenuto energetico del combustibile impiegato (MJ o kWh). In questa fattispecie la conversione si complica poiché essa dipende non solo dall'O_2 ma anche dal contenuto idrico (M) e dal tipo di legno impiegato. Per un calcolo approssimativo vale la seguente formula empirica:

1mg/Nm³ ≈ 0,65 mg/MJ ≈ 2,34 mg/kWh

5.2.3 Livelli di emissione delle caldaie

Si presentano di seguito i dati più recenti pubblicati dai più autorevoli gruppi di ricerca che si occupano di quest'argomento a scala europea. I dati sono divisi in funzione del tipo d'alimentazione, del tipo di combustibile e in parte anche della classe di potenza. Si è fatto riferimento in particolare ai parametri per i quali vale una limitazione di legge.
La figura 5.2.3.1 illustra i valori medi d'emissione delle caldaie a legna, cippato e pellet, misurati dal TFZ di Straubing (Germania) in un decennio, dal 1996 al 2006.

Figura 5.2.3.1 *Valori delle emissioni nocive delle caldaie centralizzate. Risultati di 10 anni di prove (1996-2006) presso il TFZ di Straubing (www.tfz.bayern.de)* [1]



[ ] : numero di misurazioni

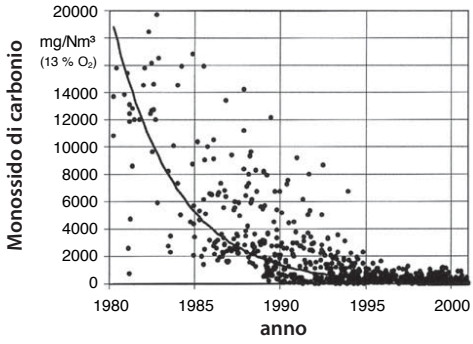
La tabella 5.2.3.1 riporta i valori medi rilevati nel corso di 169 prove di combustione effettuate presso il BLT di Wieselbug (Austria) nel periodo 1999-2004 [16].

Tabella 5.2.3.1 *Emissioni espresse in mg/Nm³*

	NO_x	COV	CO	Polveri
Caldaia a legna	131	5	100	22
Caldaia a cippato	155	<2	28	28
Caldaia a pellet	125	<2	48	17

Negli ultimi 25 anni lo sviluppo tecnologico delle caldaie di piccola-media taglia ha consentito di abbattere drasticamente le emissioni di CO.

Figura 5.2.3.2 *Risultati delle prove di certificazione del BLT di Wieselburg (blt.josephinum.at)*



Con riferimento alle caldaie manuali, sono state rilevate delle differenze tra caldaie a tiraggio naturale e a tiraggio forzato con sonda Lambda. In queste ultime le fasi più critiche della combustione (accensione, fine della combustione e carica), nelle quali cambiano notevolmente le condizioni della combustione (temperatura), sono gestite molto meglio grazie ai sistemi di regolazione. I valori migliorano nelle classi di potenza maggiore. Nelle caldaie automatiche l'emissione di CO si abbassa, poiché la combustione è molto meno disturbata. Le differenze tra cippato e pellet sono relativamente basse in condizioni di prova, tuttavia nella prassi il cippato è generalmente molto più eterogeneo del pellet, con il quale pertanto i valori reali sono certamente migliori.

L'andamento dei **composti organici volatili** è speculare a quello del CO, essendo la produzione d'incombusti carboniosi anch'essa legata alla qualità del processo di combustione. Nelle caldaie di maggiore taglia, anche in questo caso, i valori medi diminuiscono. Sia il CO che i COV aumentano non appena il carico termico richiesto si abbassa rispetto alla potenza nominale del generatore.

Impiegando biomasse legnose vergini le emissioni di NO_x rilevate corrispondono a ca. un quinto del valore limite previsto in Italia per l'intervallo di potenza 0,15-3 MW (500 mg/Nm³). In aggiunta, al contrario di quello che accade per CO e COV, siccome le caldaie nella prassi

spesso lavorano a carico parziale si abbassano le temperature di combustione e così anche l'emissione di NO_x.

L'emissione di **polveri totali** non varia in funzione della potenza e del livello di carico termico, ma varia invece in funzione di altri fattori quali la movimentazione del letto di braci, la quantità e composizione delle ceneri nel combustibile o della disponibilità di zone di calma (in camera di combustione) che favoriscono la deposizione delle polveri.

Le caldaie a cippato mostrano tendenzialmente valori maggiori rispetto a quelle manuali a legna, poiché in queste ultime il letto di braci si trova in una condizione di maggiore "calma". Lo stesso accade anche nelle caldaie a pellet, in particolare in quelle con focolare a caduta, nelle quali raramente il letto di braci è sottoposto ad una movimentazione meccanica. Inoltre il pellet è un combustibile relativamente povero di cenere.

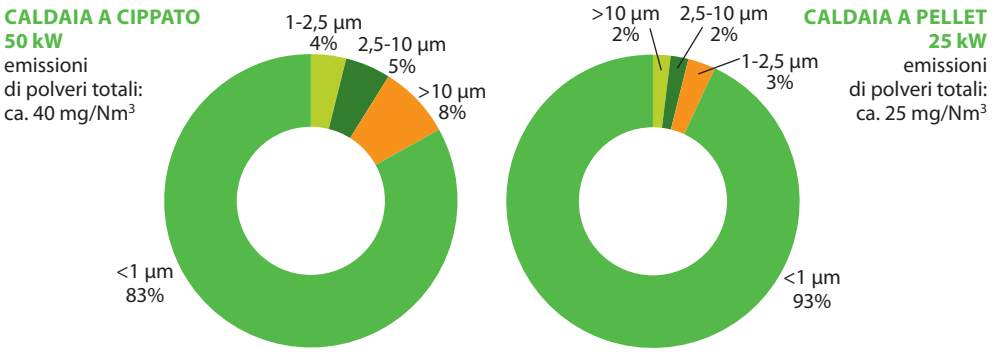
Recentemente sono stati pubblicati i risultati di uno studio del Task 32 dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA, www.ieabcc.nl) nel quale sono riportati i valori del fattore d'emissione di particolato delle caldaie, rilevati in sette paesi europei. Al di la delle problematiche relative ai metodi di misura, dallo studio risulta che:

- le caldaie a legna a tiraggio naturale mostrano valori in media più o meno superiori ai 100 mg/Nm^3
- nelle caldaie con tiraggio forzato e regolazioni elettroniche il valore medio scende sotto i 50 mg/Nm^3
- si evidenzia il fondamentale ruolo del *puffer* per la riduzione del fattore di emissione
- le caldaie a pellet presentano un valore medio intorno ai 30 mg/Nm^3, con variazioni tra 10 e 50 mg/Nm^3
- le caldaie automatiche a cippato (70-500 kW) presentano tipicamente fattori di emissione variabili tra 50 e 100 mg/Nm^3; nei casi migliori si scende fino a 30 mg/Nm^3 [14].

Complessivamente i risultati sopra riportati consentono di affermare che per le moderne caldaie l'osservanza dei limiti d'emissione fissati dalla legge italiana (§ 5.3.2) non è al momento problematica. Tuttavia, in particolare per la legna e il cippato, l'emissione di polveri è influenzata fortemente dalla gestione, ovvero dalla corretta manutenzione e dall'impiego di combustibile d'idonea qualità rispetto ai requisiti della caldaia. Questo problema rappresenta la più importante causa di contestazione all'atto delle periodiche misure di sorveglianza. Nei paesi in cui i controlli sulle emissioni si fanno sistematicamente (es. Germania), tra il 2000 e il 2005 le quote di contestazione sono diminuite sensibilmente (dal 27,8% al 13%), a testimonianza sia di un continuo miglioramento delle prestazioni delle moderne caldaie che di una maggiore consapevolezza degli utilizzatori finali [1].

Tuttavia in molti paesi europei, comprese alcuni regioni italiane, stanno per essere varati provvedimenti che ridurranno progressivamente i limiti di emissione, in particolare quelli delle polveri.

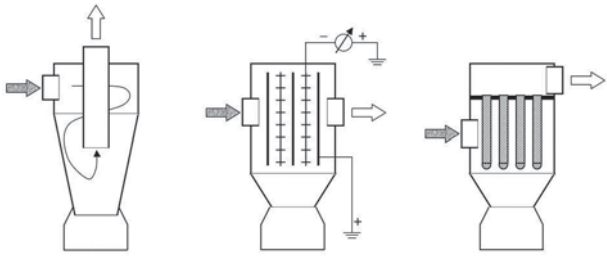
Figura 5.2.3.3 *Tipica classificazione dimensionale delle polveri prodotte dalle caldaie a cippato e pellet, misurate a potenza nominale* [1]



La maggior parte delle polveri prodotte dalla combustione rientra nel campo dimensionale inferiore a 1 µm (figura 5.2.3.3), perciò le misure complessive di riduzione delle polveri devono essere rivolte contestualmente anche alla riduzione del particolato.

Le misure di riduzione delle polveri si dividono in **misure primarie**, che riguardano nuovi sviluppi tecnologici delle caldaie (geometria della camera, immissione di aria, regolazioni) e in **misure secondarie** che invece si riferiscono ai sistemi di separazione (filtri). Sul lato dello sviluppo tecnologico ci sono certamente ancora margini di miglioramento, ad esempio recenti ricerche hanno dimostrato come attraverso una calibrata gradazione dell'aria comburente e un minore eccesso d'aria (in particolare nella zona del letto di braci) si ottiene un significativo effetto di riduzione dell'emissione di polveri (-70/80%) [17]. Riguardo ai filtri, i sistemi a gravità (multiciclone) non hanno nessun effetto di separazione sul particolato, perciò a valle del multiciclone si deve ricorrere ai più costosi filtri a manica o agli elettrofiltri (figura 5.2.3.4). La restrizione dei limiti che sarà imposta in vari stati mitteleuropei nel breve periodo, ha stimolato la ricerca tecnologica e l'implementazione di nuovi filtri elettrostatici e filtri a manica (in acciaio) applicabili in impianti inferiori a 1 MW che consentono di mantenere l'emissione di polveri rispettivamente sotto i 20 e i 5 mg/Nm^3 [15]. Tuttavia, la reale applicabilità di questi filtri negli impianti medio-piccoli (< 1 MW) richiederà, almeno inizialmente, specifici incentivi pubblici.

Figura 5.2.3.4 *Principi di funzionamento dei filtri a gravità (cicloni e multicicloni, sinistra) degli elettrofiltri (centro) e dei filtri a manica (destra)* [18]



5.3 Normativa su emissioni e rendimenti

5.3.1 Normativa europea

La norma italiana UNI EN 303-5 (ottobre 2004), che ha recepito la norma europea EN 303-5 emanata nell'aprile 1999, si applica a caldaie per il solo riscaldamento con potenza termica nominale fino a 300 kW a pressione negativa o in pressione.
Questa norma è particolarmente importante perché gli incentivi fiscali (detrazione del 55%) e molti bandi che prevedono incentivi in conto capitale o interessi richiedono la certificazione di parte terza del generatore ai sensi di questa norma (classe 3).
La norma prevede dei limiti d'emissione distinguendo alimentazione manuale ed automatica e classi di rendimento dell'apparecchio (tabella 5.3.1.2). Essa prescrive delle specifiche sulla conduzione della prova della caldaia, per la determinazione dei valori di emissione, nonché per il calcolo delle emissioni. Per le caldaie a potenza regolabile, tali valori non devono essere superati sia alla potenza termica nominale che a quella minima. Nel caso di alimentazione manuale la misura prevede due diverse fasi successive di combustione completa, compresa quindi la ricarica.

Classi di rendimento
Le caldaie sono sottoposte alle procedure standard di prova del rendimento termico nominale e sono classificate in base a tre curve di rendimento in funzione della potenza termica nominale e a un coefficiente di classe (tabella 5.3.1.1).

Tabella 5.3.1.1 *Classi di rendimento per potenze nominali e classi di rendimento*

Potenza nominale (kW)	Classe di rendimento		
	3	2	1
10	73,00	63,00	53,00
50	77,20	67,20	57,20
100	79,00	69,00	59,00
150	80,06	70,06	60,06
200	80,81	70,81	60,81
250	81,39	71,39	61,39
300	81,86	71,86	61,86

Gli stati possono introdurre delle modifiche alle disposizioni della norma europea. Ad esempio la legge austriaca sul risparmio energetico ha rivisto i livelli di rendimento per gli apparecchi a biomasse e prevede indici diversi per il rendimento minimo delle caldaie come riportato qui di seguito.

Alimentazione manuale	Rendimento minimo (Austria)	UNI EN 303-5 (classe 3)
Fino a 10 kW	73%	
Sopra i 10 fino a 200 kW	65,3 + 7,7 log Pn	
Sopra i 200 kW	83%	
Alimentazione automatica		67 + 6 log Pn
Fino a 10 kW	76	
Sopra i 10 fino a 200 kW	68,3 + 7.7 log Pn	
Sopra i 200 kW	86%	

Pn: potenza nominale

Prossimi sviluppi della EN 303-5

Attualmente è operativo un gruppo di lavoro all'interno del CEN (TC 57) che è presieduto dall'Austria la quale, assieme a pochi altri paesi europei, sta provvedendo a rivedere la norma, la quale dovrebbe essere messa in approvazione per maggio 2010.

Le principali modifiche riguarderanno l'ampliamento dell'intervallo di potenza, che arriverà fino a 500 kW , l'inserimento di due nuovi classi di rendimento (4, 5) e l'introduzione di un nuovo principio secondo il quale i risultati delle prove di combustione eseguite con il combustibile più "problematico" saranno ritenute valide anche per quello di qualità superiore.

Tabella 5.3.1.2 *Limiti di emissione della UNI EN 303-5 per le tre classi di rendimento*
Tutte le emissioni sono calcolate con riferimento ai fumi secchi al 10% di ossigeno e in condizioni normalizzate (mg/m^3) a 0 °C e 1.013 mbar.

Alimentazione	Potenza termica nominale kW	mg/Nm^3 al 10% di O_2								
		CO			OCG (=COV)			Polveri totali		
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Manuale	< 50	25000	8000	5000	200	300	150	200	180	150
	> 50 a 150	12500	5000	2500	1500	200	100			
	> 150 a 300	12500	2000	1200	1500	200	100			
Automatica	< 50	25000	8000	5000	2000	300	150			
	> 50 a 150	12500	5000	2500	1500	200	100			
	> 150 a 300	12500	2000	1200	1500	200	100			

5.3.2 Normativa italiana

Il limiti di emissioni e le caratteristiche delle biomasse combustibili sono definiti dal D.lgs del 3 aprile 2006, n. 152 denominato "Norme in materia ambientale - Testo Unico Ambientale (TUA)". L'allegato 1 parte III del decreto stabilisce i valori d'emissione per specifiche tipologie d'impianti e al sottocapitolo 1.1 per impianti nei quali sono utilizzati combustibili solidi di cui all'allegato X, tra cui le biomasse combustibili (tabella 5.3.2.1). Si applica agli impianti nuovi e a quelli anteriori al 2006 autorizzati a partire dal 12 marzo 2002.

Tabella 5.3.2.1 *Limiti di emissione del D.lgs 152/2006*

	Potenza termica nominale installata				
	35 - 150 kW	150kW - ≤3MW	>3 - ≤6MW	>6 - ≤20MW	>20MW
	Valori espressi in mg/Nm^3				
Polveri totali	200	100	30	30	30
Carbonio organico totale (COT)	-	-	-	30	20 10(2)
Monossido di carbonio (CO)	-	350	300	250 150(2)	200 100(2)
Ossidi di azoto (espressi in NO_2)	-	500	500	400 300(2)	400 200(2)
Ossidi di zolfo (espressi in SO_2)	-	200	200	200	200

I valori si riferiscono ad un tenore di ossigeno nell'effluente gassoso dell'11%.

(2) Valori medi giornalieri

La legislazione italiana richiede certamente di essere adeguata in particolare rispetto allo sviluppo tecnologico degli apparecchi termici di piccola taglia. Basti ricordare che in questo momento sul mercato si trovano caldaie a pellet a partire da 4 kW.
Inoltre, anche la parte dedicata alla definizione delle biomasse combustibili (vergini) richiede un urgente adeguamento, facendo riferimento alle specifiche CEN/TS 14961.

5.4 Norme per la gestione, manutenzione e sicurezza

Di seguito si riportano le principali norme che riguardano la sicurezza degli impianti termici e la prevenzione incendi.

Sicurezza dell'impianto	D.M. 1 dicembre 1975 Raccolta R, ediz 1982 e 2005 Raccolta H, ediz. 1982 D.M. 22 gennaio 2008 n° 37 UNI EN 303-5 Norme UNI
Prevenzione incendi	D.M. 16 dicembre 1982 D.P.R. 12 gennaio 1998 n° 37 D.lgs 81/08 Norme UNI

Vaso di espansione
Questo aspetto della sicurezza idraulica dell'impianto è disciplinato da I.S.P.E.S.L. nella Raccolta R, Fasciolo R3 – Edizione 2005. Diversamente da quanto accade in altri paesi europei, attualmente l'installazione del vaso di espansione chiuso è possibile solo nel caso di generatori ad alimentazione automatica (cippato e pellet), mentre per le caldaie manuali (legna) la norma prevede solo il vaso aperto. Tuttavia, spesso si ricorre al vaso chiuso anche per le caldaie manuali. Installando infatti moderne caldaie con adeguati sistemi di sicurezza e prevedendo un accumulatore correttamente dimensionato, si ottiene la piena sicurezza idraulica dell'impianto anche con il vaso chiuso e in più si evitano i fenomeni di sporcamento causati dai processi di ossidazione – tipici del vaso aperto – che possono agire negativamente sia sulla funzionalità dell'impianto sia sulla lunghezza della sua vita utile.

Responsabile dell'impianto (D.P.R. 412/93)
Il responsabile dell'impianto è:
- **l'occupante** dell'immobile a qualsiasi titolo nel caso di impianti individuali;
- **l'amministratore del condominio** nel caso di impianti centralizzati;
- **l'amministratore** nel caso di soggetti diversi dalle persone fisiche (società, enti, etc…);
- **il terzo responsabile** nel caso di affidamento delle responsabilità ad un'impresa qualificata;
- in tutti gli altri casi la responsabilità ricade comunque sul **proprietario**.

Si riporta di seguito la documentazione che il responsabile dell'impianto deve esibire all'atto della verifica da parte dell'ente pubblico.

POTENZA (kW)	DOCUMENTO	RILASCIATO DA
< 35	Dichiarazione di conformità	Installatore
	Libretto impianto	Manutentore
	Rapporto di controllo tecnico	
> 35 e < 116	Dichiarazione di conformità	Installatore
	Libretto impianto	Manutentore
	Rapporto di controllo tecnico	
	Denuncia impianto I.S.P.E.S.L.	Responsabile all'impianto
> 116 e < 232	Dichiarazione di conformità	Installatore
	Libretto impianto	Manutentore
	Rapporto di controllo tecnico	
	Denuncia impianto I.S.P.E.S.L.	Responsabile all'impianto
	Certificato prevenzione incendi	
> 232 e < 350	Dichiarazione di conformità	Installatore
	Libretto impianto	Manutentore
	Rapporto di controllo tecnico	
	Denuncia impianto I.S.P.E.S.L.	Responsabile all'impianto
	Certificato prevenzione incendi	
> 350	Dichiarazione di conformità	Installatore
	Libretto impianto	Manutentore
	Rapporto di controllo tecnico	
	Denuncia impianto I.S.P.E.S.L.	Responsabile all'impianto
	Certificato prevenzione incendi	

Controllo, manutenzione e ispezioni

Una regolare gestione complessiva dell'impianto termico garantisce di massimizzare il risparmio energetico ed economico, dà maggiori garanzie di sicurezza e di rispetto dell'ambiente.

La manutenzione deve sempre essere eseguita da una ditta in possesso dei requisiti stabiliti dal D.M. 37/08 (ex legge n° 46/90).

Il controllo completo con prova di combustione va svolto con le tempistiche sotto riportate, al fine di garantirne un corretto ed efficiente funzionamento. Il controllo deve essere fatto secondo le indicazioni riportate nel libretto d'uso e manutenzione dell'impianto.

Potenza < 35 kW	Ogni 2 anni
Potenza ≥ 35 kW	Ogni anno
Potenza ≥ 350 kW	Per le centrali dotate di uno o più generatori di calore con potenza nominale complessiva uguale o superiore è prevista anche una seconda determinazione del solo rendimento di combustione da compiersi a metà del periodo di riscaldamento.

Esiste un regime sanzionatorio sia per il proprietario, il manutentore e anche l'installatore, per la mancata effettuazione dei controlli e prove periodiche e per aver svolto le prove non a regola d'arte (D.lgs 192/2005).

BIBLIOGRAFIA

1 **HARTMANN H.** (Hrsg.) *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen 2007* (2. Auflage). Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow (DE) 224 S., ISBN 3-00-011041-0, Mai 2007.

2 **BAGGIO P.** 2009. *Le emissioni: quadro generale sulla misura degli inquinanti. Approfondimento sulle attività sperimentali di caratterizzazione delle emissioni.* Atti dell'incontro tecnico organizzato da Progetto Fuoco. www.progettofuoco.com.

3 **GREIMEL B., GLETTLER R., LAMMER H.** 2005 *Beratungshandbuch Scheitholzfeuerungen* (3. Auflage). Regionalenergie Steiermark und Waldverband Steiermark. Graz Österreich.

4 **FNR**-Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2004 (4. Auflage). *Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel Scheitholz-pellet-Kombinazionskessel.* Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)

5 **FNR**-Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2008 (2. Auflage). *Marktübersicht Hackschnitzel-Heizungen*. Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Förderung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)

6 **AA.VV.** 1995. *La progettazione di impianti automatici di combustione a legna.* Programma d'impulso PACER - Energie rinnovabili Ufficio federale dei problemi congiunturali. Berna. ISBN 3-905232-82-0.

7 **AA.VV.** 2008. *QM – Qualitäts-Management Holzheizwerke Planunshandbuch*. 2. Auflage. ISBN 3-937441-94-8.

8 **FRANCESCATO V., ANTONINI E., ZUCCOLI BERGOMI L.** 2009. *Legna e Cippato, produzione, requisiti qualitativi e compravendita*. Ed. AIEL, supportata da EACI-IEE, progetto www.biomasstradecentres.eu.

9 **AA.VV.** 2007. *Le minireti di teleriscaldamento a cippato in Toscana, l'esperienza dei GAL toscani*. Ed. ARSIA – Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel Settore Agricolo-Forestale della Regione Toscana. ISBN 88-8295-090-5.

10 **LOO VAN S., KOPPEJAN J.** 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. London Sterling, VA. ISBN 978-1-84407-249-1.

11 **ORTNER H.** 2006. *Technik moderner Pelletskessel mit Brennwerttechnik*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

12 **AA.VV.** 2009. *La filiera legno-energia, risultati del progetto interregionale Woodland Energy*. Ed. ARSIA – Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel Settore Agricolo-Forestale della Regione Toscana. ISBN 978-88-8295-106-1.

13 **FRANCESCATO V., ANTONINI E., GRIGOLATO S., EMER B.** 2006. *Creazione del Sistema Informativo Territoriale per il monitoraggio delle filiere legno-energia nella regione Friuli Venezia Giulia*. Progetto PROBIO Woodland Energy.

14 **NUSSBAUMER T., CZASCH C., KLIPPEL N., JOHANSSON L., TULLIN C.** 2008. *Particulate emissions from Biomass Combustion in IEA Countries, survey on measurements and emission factors*. On behalf of IEA Task 32 and Swiss Federal Office of Energy (SFOE). ISBN 3-908705-18-5.

15 **FRANCESCATO V.** 2007. *Combustione del legno e polveri fini, fattori di emissione ed effetti sulla salute delle moderne caldaie di piccola e media taglia*. Sherwood n° 133.

16 **SCHWARZ M.** 2006. *Argumentazionsleitfaden Feinstaub*. Austrian Bioenergy Centre GmbH, Wieselburg, Österreich.

17 **OSER M.** 2006. *Praxiserfahrungen mit Low-Particle-Feuerungen für Holzpellets*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

18 **NUSSBAUMER T.** 2007. *Valutazione tecnico-economica della separazione del particolato*. Rivista Tecnica Agriforenergy N. 1/07. Ed. AIEL.

Principali produttori e distributori di caldaie

Nome azienda	Marchi	Intervalli di potenza			web
		Legna	*Cippato*	*Pellet*	
ALMAR	**GILLES EDER**	15-75 kW	85kW-6 MW	12,5-160 kW	caldaie-biomassa.com
ARCA	**ARCA**	34-60 kW 34-174 kW	–	30-150 kW	arcacaldaie.com
BAXI	**BAXI**	20-48 kW	25-43 kW	25-43 kW	baxi.it
BIO-SOL	**BIOKOMPAKT KÜNZEL**	15-50 kW	20-130 kW	10-20 kW	bio-sol.it
CLIM-AIR 50	**THERMICBEAR**	-	28-800 kW	28-800 kW	climair50.com
CT PASQUALICCHIO	**CT PASQUALICCHIO**	20-81 kW	–	24-32 kW	ctpasqualicchio.it
DA CANAL BIOENERGIE	**ALA - TALKKARI**	28-40 kW	30-300 kW	30-300 kW	dacanal.com ala-talkkari.fi
D'ALESSANDRO TERMOMECCANICA	**D'ALESSANDRO**	24-29 kW	40 kW-2 MW	25 kW-2 MW	caldaiedalessandro.it
ECOENERGIE	**HOLZMAX TURBOMAX SOMMERAUER&LINDNER**	20-45 kW	30-150 kW	12-40 kW	ecoenergie.it
ETA-ITALIA	**ETA**	15-23 kW (*)	20-200 kW	15-25 kW 32-90 kW	eta-italia.it
ETATECH	**BINDER**	–	200 kW-20 MW	200 kW-20 MW	etatech.info
ETI ECOTERMICA IMPIANTI	**VULCAN**	30-150 kW	30-50 kW fino a 1,5 MW	30-150 kW	ecotermica.net
EUROAGRAR	**HDG BAVARIA**	12-15 kW 20-50 kW	30-200 kW	15-25 kW	euroagrar.com
F.LLI LAVIA	**LAVIA**	30-80 kW	30-280 kW	25-50 kW	lavia.it
FISCHER	**FISCHER**	25-40 kW	–	14-23 kW	fischer-heiztechnik.de
FRÖLING ITALIA	**FRÖLING**	15-60 kW 18-45 kW	28-100 kW 150-500 kW 150 kW-1 MW	8-60 kW 28-100 kW	froling.it
GUNTAMATIC	**GUNTAMATIC**	20-30 kW 40-50 kW	7-50 kW 30-50 kW 20-100 kW	12-23 kW 30-50 kW	guntamatic.at widmann-heizungen.it
HARGASSNER	**HARGASSNER**	–	25-55 kW 70-110 kW 150-200 kW	12-22 kW 25-49 kW 70 -100 kW	hargassner.at widmann-heizungen.it ecoenergy-italia.it

(*) Caldaia combinata legna a pezzi e pellet (**) Caldaia combinata legna a pezzi e cippato

Nome azienda	Marchi	Intervalli di potenza			web
		Legna	*Cippato*	*Pellet*	
HERZ	**HERZ**	15-40 kW	7,3-65 kW 27-150 kW 54-500 kW	3-62,5 kW	herz-feuerung.com
KWB ITALIA	**KWB**	20-50 kW	15-100 kW 130-300 kW	10-30 kW 15-100 kW 130-300 kW	kwbitalia.it
MEPE	**BEQUEM**	35-70 kW	20-40 kW 60 kW-3MW	12-50 kW	mepesrl.it
MESCOLI CALDAIE	**MESCOLI**	30-160 kW	–	28-50 kW	mescolicaldaie.it
METALREF HIGH TECH	**METALREF**	–	175 kW-3,5 MW fino a 5 MW	175 kW-3,5 MW fino a 5 MW	metalref.it
NORDICA EXTRAFLAME	**NORDICA EXTRAFLAME**	20-50 kW	–	–	lanordica-extraflame.com
ÖKOFEN ITALIA	**ÖKOFEN**	–	–	2-224 kW 12-32 kW	oekofen.it
OSA CALDAIE	**OSA**	28-116 kW	–	25 - 350 kW	osacaldaie.it
SAN HELL	**HEIZOMAT** **HEITZMANN**	20-120 kW	15-300 kW 36-850 kW	15-300 kW 36-850 kW	san-hell.com heitzmann.ch
SCHMID ITALIA	**SCHMID**	20-80 kW	30-180 kW fino 25 MW	10-150 kW	holzfeuerung.ch
SHT HEIZTECNIK	**SHT**	11- 52 kW 4,5-38 kW (*)	–	2,3-12 kW 4,5-38 kW (*)	sht.at
SOLARFOCUS	**SOLARFOCUS**	20-60 kW 27-30 kW (*) 40-60 kW (**)	40-60 kW (**)	4,5-15 kW 27-30 kW (*)	solarfocus.at
TATANO	**KALORINA**	21-116 kW	46-116 kW 151-581 kW	46-116 kW 151-581 kW	tatano.it
TERMOCABI	**TERMOCABI**	–	–	25 kW-1 MW	termocabi.it bluenergysrl.it
THERMOROSSI	**THERMOROSSI**	24-102 kW	–	18-32 kW	termorossi.com
UNICAL	**UNICAL**	25-46 kW	–	–	unicalag.it
UNICONFORT	**UNICONFORT**	–	93 kW-5,8 MW 348 kW-5,8 MW	93 kW-5,8 MW 348 kW-5,8 MW	uniconfort.com
VIESSMANN	**VIESSMANN** **KÖB** **MAWERA**	35-170 kW	35-85 kW (**) 80-540 kW 110 kW-13 MW	4 kW-4 MW	viessmann.it
WINDHAGER ITALIA	**WINDHAGER**	18-50 kW	–	10-26 kW	windhager.it

(*) Caldaia combinata legna a pezzi e pellet (**) Caldaia combinata legna a pezzi e cippato

Progetto interregionale Woodland Energy

"La filiera legno-energia come strumento di valorizzazione delle biomasse legnose agroforestali"

Coordinamento

Regione Toscana
Direzione Generale dello Sviluppo Economico
Settore Programmazione Forestale

Arsia - Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale

Partner del progetto

Regione Abruzzo
Direzione Agricoltura

Arssa - Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo - Abruzzo

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Direzione centrale Risorse agricole, naturali e forestali
Servizio Gestione forestale e Antincendio boschivo

Regione Lazio
Direzione Regionale Agricoltura - Area 7

Arsial - Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio
Area Studi e Progetti

Regione Liguria
Dipartimento Ambiente

Regione Marche
Servizio Agricoltura, Forestazione e Pesca

Assam - Agenzia Servizi Settore Agroalimentare Marche

Regione Molise
Assessorato Agricoltura, Foreste e Pesca produttiva
Servizio Tutela forestale

Regione Siciliana
Assessorato Agricoltura e Foreste
Dipartimento Interventi infrastrutturali - Servizio X Leader

Regione Umbria
Servizio Foreste ed Economia montana

Segreteria tecnica

Associazione Italiana
Energie Agroforestali

Con il cofinanziamento del Programma Biocombustibili (ProBio) - Mipaaf

Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali

Direzione Generale
Sviluppo rurale, infrastrutture e servizi